



HAL
open science

Application de l'analyse de sensibilité temporelle pour la description de la réponse thermique d'un bâtiment aux actions des habitants

Léa Gondian

► To cite this version:

Léa Gondian. Application de l'analyse de sensibilité temporelle pour la description de la réponse thermique d'un bâtiment aux actions des habitants. Génie civil. Université Savoie Mont Blanc, 2019. Français. NNT : 2019CHAMA003 . tel-02513397v2

HAL Id: tel-02513397

<https://hal.science/tel-02513397v2>

Submitted on 14 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC

Spécialité : **Génie Civil et Sciences de l'Habitat**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Léa GONDIAN

Thèse dirigée par **Monika WOLOSZYN**

et codirigée par **Étienne WURTZ**

préparée au sein du **LOCIE (USMB)**

et du **SBST (CEA/LITEN)**

dans l'École Doctorale **SISEO**

Application de l'analyse de sensibilité temporelle pour la description de la réponse thermique d'un bâtiment aux actions des habitants.

Thèse soutenue publiquement le **17 décembre 2019**,

devant le jury composé de :

M. Jean-Louis SCARTEZZINI

Professeur, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, **Président du jury**

M. Bruno PEUPORTIER

Directeur de recherche, MINES ParisTech, Rapporteur

M. Laurent MORA

Maître de conférences HDR, Université de Bordeaux, Rapporteur

M. Francis ALLARD

Professeur, Université de La Rochelle, Examineur

Mme Monika WOLOSZYN

Professeure, Université Savoie Mont Blanc, Directrice de thèse

M. Étienne WURTZ

Directeur de recherche, CEA/LITEN, Co-Directeur de thèse

Mme Catherine BUHÉ

Maître de conférences, Université Savoie Mont Blanc, Co-Encadrante de thèse

Mme Jeanne GOFFART

Ingénieure de recherche, Université Savoie Mont Blanc, Co-Encadrante de thèse

M. Philippe MARÉCHAL

Ingénieur de recherche, CEA/LITEN, Invité

"À mon grand-père, Robert Gondian"

Remerciements

Il est important pour moi de remercier les personnes qui ont contribué, de près comme de loin, à mon obtention du grade de Docteur de l'Université Savoie Mont Blanc !

Je tiens ainsi à remercier fortement les membres de mon jury. Merci à Bruno Peuportier et Laurent Mora qui ont rapporté mes travaux de thèse. Leurs avis et conseils m'ont été d'une grande aide pour préparer la soutenance. Merci à Francis Allard qui a évalué mon travail et dont les remarques m'ont permis d'enrichir ce manuscrit. Merci à Jean-Louis Scartezzini qui a également évalué mes travaux, assuré le rôle de président du jury et qui a formidablement su interpellier le public venu assister à ma soutenance.

Je remercie aussi sincèrement les personnes qui ont participé à l'encadrement de mes travaux de thèse durant ces trois années. Tout d'abord, merci à Monika et Catherine qui ont cru en moi et m'ont proposé de faire une thèse avec elles. Merci à Étienne pour son investissement dans le déroulement de ma thèse et l'entière confiance et liberté qu'il m'a accordées. Merci à Arnaud et Philippe pour leur présence et conseils avisés. Un grand merci à Jeanne, amie et encadrante de proximité, qui a rejoint l'équipe un peu plus tard et dont la contribution à l'aboutissement de ce travail est immense.

Inévitablement et comme tous les doctorants du LOCIE qui l'ont rencontré, je remercie Nicolas C. pour l'indispensable et sans limite aide « pythonesque » qu'il m'a apporté. Un immense merci également à Aurélie qui m'a aidée, jour après jour, à déjouer les pièges d'EnergyPlus. Merci à Adrien qui a fait en sorte que toutes mes simulations s'exécutent en un éclair. Merci à Nicolas S. pour les magnifiques figures qu'il m'a dessinées et qui m'ont servi à illustrer le contexte de cette thèse.

Merci à mes co-bureaux, Patricia puis Aurélie et Jocelyn, vous avez rendu ces journées devant mon ordinateur bien plus belles et plus joyeuses.

Plus généralement, un immense merci à mes collègues et amis du LOCIE et du SBST, vous avez tous largement contribué à faire de cette expérience une réussite ! Je conserverai

toujours précieusement la photo que vous avez prise pour moi sur laquelle vous vous êtes tous réunis.

Ce serait une terrible erreur de croire que pendant ces trois années, seul mon environnement de travail a eu de l'importance. Merci à mes colocataires ! Merci à mes amis chambériens ! Vous m'avez fait me sentir bien pendant cette aventure. Mille et mille mercis !

Ma famille a également joué un rôle important dans cette aventure. Merci maman de m'avoir encouragée tout au long de mes études et de m'avoir fait saisir l'opportunité de faire cette thèse. Merci papa pour la fierté que tu me portes. Merci à mon frère qui ne m'oublie pas même quand il part vivre sur une île paradisiaque.

Enfin, merci à mon compagnon, merci Nicolas, merci tout simplement pour ta présence à mes côtés.

Table des matières

Remerciements	i
Liste des tableaux	vii
Table des figures	ix
Nomenclature	xv
Introduction générale	1
1 L’habitant partenaire de la performance du bâtiment	3
1.1 Interactions à l’échelle d’un bâtiment	5
1.2 Complémentarité entre les actions de l’habitant et la domotique	8
1.3 Relation entre le confort et l’occupant	11
1.3.1 Le confort d’été, un enjeu majeur dans le bâtiment	11
1.3.2 Évaluation du confort thermique à l’intérieur d’un bâtiment	14
1.4 Objectif : l’habitant partenaire de la performance du bâtiment	19
2 D’une approche déterministe vers une approche statistique pour la description de la réponse thermique d’un bâtiment	23
2.1 Outils numériques pour étudier la réponse thermique d’un bâtiment	25
2.1.1 Simulation thermique dynamique de bâtiment	25
2.1.2 Reproduction du comportement des occupants	27
2.1.3 Limites de l’approche classique	29
2.2 Outils statistiques pour la quantification des impacts des habitants	31
2.2.1 Méthodes d’analyse de sensibilité	31
2.2.2 Méthodes d’échantillonnage	39
2.2.3 Analyses de sensibilité appliquées au bâtiment	44

2.3	Objectif scientifique du présent travail	52
3	Application de l'analyse de sensibilité temporelle à la problématique du confort d'été dans un bâtiment résidentiel	55
3.1	Description de la méthodologie	57
3.2	Présentation du cas test et de son modèle	58
3.2.1	Description du cas test	58
3.2.2	Hypothèses de modélisation	61
3.2.3	Confrontation aux résultats expérimentaux	63
3.2.4	Présentation du fichier météo	66
3.3	Déroulement de la méthodologie sur une maison existante	67
3.3.1	Sélection des actions des habitants	67
3.3.2	Hypothèses relatives à la propagation des actions dans le modèle .	72
3.3.3	Étude des combinaisons d'actions générées par l'échantillonnage LHS	78
3.3.4	Mise en évidence des risques de surchauffe et du potentiel d'amélioration	81
3.3.5	Étude des indices de sensibilité	86
3.3.6	Étude des variances partielles	90
3.3.7	Convergence des résultats	93
3.3.8	Introduction des variances partielles signées	95
3.3.9	Vers de nouveaux indicateurs	101
4	Évaluation de la robustesse d'une conception de bâtiment et recherche d'éco-comportements	109
4.1	Introduction	111
4.2	Comparaison de deux variantes d'un bâtiment : impact de l'inertie	111
4.2.1	Objectif et contexte de l'étude	111
4.2.2	Démarche employée	113
4.2.3	Résultats obtenus pour la zone de jour	115
4.2.4	Résultats obtenus pour la zone de nuit	124
4.2.5	Conclusion de l'étude	132
4.3	Comparaison de deux modes de gestion : pertinence du recours à la ventilation naturelle nocturne	133
4.3.1	Objectif et contexte de l'étude	133
4.3.2	Démarche employée	133
4.3.3	Résultats obtenus pour la zone jour	135
4.3.4	Résultats obtenus dans la zone nuit	141
4.4	Conclusion : des comportements adaptés	146

Conclusion générale	147
Perspectives	151
Bibliographie	I
Annexes	IX
A Description du cas d'étude	IX
A.1 Description thermique	X
A.2 Plans	XII
B Étude de la ventilation naturelle - Variances partielles signées	XIII
B.1 Variances partielles signées obtenues dans le séjour-cuisine	XIV
B.2 Variances partielles signées obtenues dans la chambre 1	XV

Liste des tableaux

3.1	Scénarios de présence incorporés dans la méthodologie	69
3.2	Scénarios d'action utilisés pour l'application de la méthodologie	69
3.3	Plages de variation des actions	71
3.4	Récapitulatif des valeurs utilisées pour appliquer l'échantillonnage LHS .	77
3.5	Calculs des 5 indicateurs obtenus pour le cas test pour les actions influentes	104
3.6	Calculs des 5 indicateurs dans le séjour-cuisine la journée de 07h à 22h pour les actions influentes	105
3.7	Calculs des 5 indicateurs dans la chambre 1 de 22h à 7h pour les actions influentes	106
4.1	Récapitulatif des actions et de leur plage de fonctionnement utilisées pour générer les échantillons	113
4.2	Liste des actions et de leur plage de fonctionnement pour générer les 1000 échantillons	134

Table des figures

1.1	Vision holistique d'éléments pouvant influencer sur les performances d'un bâtiment résidentiel comme l'efficacité des systèmes installés, l'enveloppe du bâtiment, le climat, l'environnement proche et lointain ou les occupants	5
1.2	Interactions des habitants dans les phénomènes couplés thermo-hygro-aérauliques dans le bâtiment, schéma adapté de Woloszyn (1999)	6
1.3	Exemple de quantification de l'impact des habitants sur la consommation de chauffage pour des bâtiments identiques réalisée par Andersen (2012)	7
1.4	Leviers qui peuvent être activés pour contribuer à la performance énergétique des bâtiments : les solutions passives et les solutions actives. (IdelecPlus (2017))	8
1.5	Présentation de quelques fonctionnalités offertes par la domotique, SWA-TEK (2017)	9
1.6	Interaction en jeu dans la performance <i>in vivo</i> d'un bâtiment d'après Brisepierre et Roche (2013)	10
1.7	Anomalie de la température moyenne annuelle de l'air, en surface, par rapport à la normale de référence : température moyenne en France (l'indicateur est constitué de la moyenne des températures de 30 stations météorologiques. Le zéro correspond à la moyenne de l'indicateur sur la période 1981-2010, soit 12,5 °C) (MétéoFrance (2018a))	11
1.8	Caractérisation d'une vague de chaleur à partir de l'indicateur thermique quotidien sur la France en durée (date de début et de fin), intensité max et sévérité (partie marron de la courbe de température) (MétéoFrance (2018b))	12
1.9	Vagues de chaleur recensées en France sur la période 1947-2019 (MétéoFrance (2019))	12
1.10	Nombre cumulé d'indices de confort apparaissant dans la littérature au cours du temps Carlucci et Pagliano (2012)	14
1.11	Détermination de la valeur du PPD en pourcentage en fonction de l'indice PMV	16

1.12	Relation entre la température optimale dans un bâtiment et la température extérieure (Nicol et Humphreys (2002))	16
1.13	Valeurs de base de la température opérative intérieure pour des bâtiments non climatisés en fonction d'une température extérieure en moyenne glissante pondérée exponentiellement, extrait de la norme NF EN 15251 (2007) 18	18
1.14	Tableau décrivant l'application des catégories utilisées, extrait de la norme NF EN 15251 (2007)	18
1.15	Dispersion de la température intérieure en été sur une maison témoin avec 1000 scénarios de comportements simulés (Vorger (2014))	20
2.1	Principe de découpage en deux volumes d'air d'un bâtiment et prise en compte des parois en simulation thermique dynamique tiré de Peuportier (2016)	26
2.2	Structure du logiciel EnergyPlus (EnergyPlus (2016))	27
2.3	Exemple de résultats obtenus pour le test paramétrique visant à évaluer l'impact de l'augmentation et de la diminution de la température de consigne de chauffage de 1°C sur la consommation d'énergie d'un bâtiment proposé par Gaetani <i>et al.</i> (2016)	30
2.4	Schéma de fonctionnement de la méthode FAST en 3 étapes, adapté en français d'après Plischke (2017)	37
2.5	Processus de Monte Carlo pour la propagation d'échantillons dans un modèle numérique. Dans cette figure, les entrées sont associées à une loi normale (x_1, x_2), triangulaire (x_3), ou sont catégorielles (x_4) ou discrètes (x_k), d'après Tarantola (2014)	39
2.6	Lois de distribution utilisées dans Spitz (2012)	40
2.7	Loi de distribution cumulée associée à une loi uniforme et sélection de 5 valeurs $U(1), \dots, U(5)$ à partir du tirage aléatoire de 5 valeurs $RU(1), \dots, RU(5)$ dans l'intervalle $[0,1]$, d'après Helton et Davis (2003)	41
2.8	Loi de distribution cumulée associée à une loi uniforme et sélection de 5 valeurs par LHS $U(1), \dots, U(5)$ à partir du tirage aléatoire de 5 valeurs $RU(1), \dots, RU(5)$ dans l'intervalle $[0,1]$. La délimitation des 5 sous-espaces d'équiprobabilité apparaît en traits pleins, d'après Helton et Davis (2003)	42
2.9	Échantillons obtenus à partir des trois différentes méthodes de Monte Carlo pour une même variable pour un échantillonnage de taille 1000, d'après Spitz (2012)	43
2.10	Détermination de trois trajectoires 2.10a, 2.10b, 2.10c (en rouge) par la méthode de Morris pour un plan d'expériences à trois variables, variant sur trois niveaux, d'après Munaretto (2014)	43

2.11	Application d'une méthode d'analyse de sensibilité locale (RSS = Root Sum-Square) à un bâtiment pour étudier l'influence de la variation de paramètres (WWR = Window to Wall area Ratio) sur la consommation d'énergie annuelle, d'après Rasouli et al. (2013)	45
2.12	Application de la méthode de Morris à un bâtiment pour étudier l'influence de 105 paramètres sur la consommation de chauffage. Les trois paramètres les plus influents sont, par ordre décroissant : la température de consigne de chauffage, le taux de renouvellement d'air et le nombre d'occupants, d'après Corrado et Mechri (2009)	46
2.13	Résultats de l'étude menée par Rouleau (2019) afin d'évaluer l'impact du comportement des occupants sur la performance globale de logements . . .	47
2.14	Application de la méthode de Sobol pour étudier l'évolution de l'influence de 10 paramètres sur la température intérieure grâce aux indices de sensibilité du premier ordre, d'après Spitz (2012)	48
2.15	Indices de sensibilité obtenus par Ioannou et Itard (2015) pour observer l'évolution de l'influence de 4 paramètres liés à l'occupant sur le confort thermique au cours d'une journée hivernale pour deux typologies de bâtiment	50
2.16	Visualisation sur 5 jours d'une semaine chaude de la variation du sens de l'impact d'une variable sur le confort thermique au cours d'une partie de la journée (Ignjatovic et al. (2016))	51
3.1	Disposition des ouvertures du bâtiment suivant les différentes façades et vue en coupe du bâtiment	59
3.2	Visualisation du zonage thermique du rez-de-chaussée et de l'étage	62
3.3	Identification d'une période d'absence du 08 au 19 juillet grâce à l'analyse de l'évolution de la puissance électrique des usages non réglementaires (en haut) et du taux de CO_2 dans le séjour-cuisine (en bas)	64
3.4	Évolution de la température d'air simulée (trait plein), mesurée (trait discontinu) et plage d'incertitude de $\pm 1^\circ C$ du capteur dans la pièce séjour-cuisine. La température d'air extérieure mesurée est tracée en trait pointillé	65
3.5	Températures et précipitations en été de 1959 à 2018, MétéoFrance (2018a)	66
3.6	Profils de température d'air et de rayonnement solaire direct relevés durant la période de chaleur	67
3.7	Profils de température opérative dans le séjour-cuisine lorsque les volets sont entièrement ouverts et entièrement fermés	70
3.8	Représentation 3D du bâtiment test modélisé	73

3.9	Visualisation des échanges aérauliques modélisés. Les carrés représentent les volumes d'air associés à chaque zone et les points représentent les noeuds de calcul des pressions	75
3.10	Illustration sur une action de l'étude du partitionnement de la loi de distribution cumulative associée avec la méthode LHS	78
3.11	Représentation de l'ensemble des combinaisons associées à l'ouverture des volets le matin et l'ouverture des volets le midi obtenues par l'étape d'échantillonnage. Les valeurs indiquées correspondent au nombre de combinaisons se trouvant dans les différents sous-espaces délimités	80
3.12	Évolution de la température opérative pour les 1000 simulations sur la saison estivale et mise en évidence de la période d'étude (en orange)	82
3.13	Évolution de la médiane (trait plein), de l'intervalle de confiance à 50% (traits discontinus), de l'intervalle de confiance à 95% (traits pointillés) et de la courbe enveloppe min-max (en orange) de la température opérative dans le salon sur la période à risque	83
3.14	Évolution de l'écart-type des températures obtenues sur les 3 premiers jours de la période à risque	85
3.15	Étude des risques et de la marge de manoeuvre possible sur la période du 25/07 au 09/08	85
3.16	Évolution des indices cumulés de sensibilité du premier ordre	87
3.17	Évolution des indices de sensibilité du premier ordre de chaque action.	89
3.18	Évolution des variances partielles associées aux actions influentes.	92
3.19	Courbe de convergence de la moyenne et de la variance de la température opérative à trois instants différents et intervalle de confiance à $\pm 5\%$ associé ainsi que la convergence de l'indice de sensibilité associé à l'ouverture des fenêtres	94
3.20	Principe de détermination du coefficient de Spearman pour deux heures différentes, le coefficient de Spearman correspond au coefficient de régression linéaire entre les rangs des observations	97
3.21	Signes associés à la variance partielle de l'ouverture des fenêtres le midi pour chaque heure de la période d'étude	98
3.22	Évolution de la variance partielle signée associée à chaque action	100
4.1	Emplacement de l'isolation de l'enveloppe (en jaune) en fonction de la variante testée	112
4.2	Récapitulatif des étapes pour comparer l'influence des actions sur différentes variantes d'un bâtiment	114

4.3	Évolution des courbes enveloppes des profils de température obtenus dans la zone de jour pour chacune des variantes, la couleur la plus foncée représente la superposition des courbes enveloppes	115
4.4	Étude des risques et de la marge de manœuvre possible pour les deux variantes dans la zone de jour	117
4.5	Évolution des variances partielles signées pour les 12 actions testées sur la période allant du 25 juillet au 9 août dans la zone séjour-cuisine sur les heures de journée de 7h à 22h pour la variante ITI (en noir) et la variante ITE (en rouge)	119
4.6	Comparaison des indicateurs a) d'échauffement, b) d'échauffement global et c) de résilience dans la zone de jour	121
4.7	Comparaison des indicateurs a) de rafraîchissement et b) de rafraîchissement global dans la zone de jour	122
4.8	Évolution des courbes enveloppes des profils de température obtenus dans la zone de nuit pour chacune des variantes, la couleur la plus foncée représente la superposition des courbes enveloppes	124
4.9	Étude des risques et de la marge de manœuvre possible pour les deux variantes dans la zone de nuit	126
4.10	Évolution des variances partielles signées pour les 5 actions testées influentes sur la période allant du 25 juillet au 9 août dans la chambre 1 sur les heures de nuit de 22h à 7h pour la variante ITI (en noir) et la variante ITE (en rouge)	128
4.11	Comparaison des indicateurs a) d'échauffement, b) d'échauffement global et c) de résilience dans la zone de nuit	130
4.12	Comparaison des indicateurs a) de rafraîchissement et b) de rafraîchissement global dans la zone de nuit	131
4.13	Évolution des courbes enveloppes des profils de température obtenus dans la zone de jour pour chacune des variantes, la couleur la plus foncée représente la superposition des courbes enveloppes	135
4.14	Étude des risques et de la marge de manœuvre possible avec 14 actions testées dans la zone de jour pour les deux variantes	137
4.15	Comparaison des indicateurs a) d'échauffement, b) d'échauffement global et c) de résilience dans le séjour-cuisine en journée	139
4.16	Comparaison des indicateurs a) de rafraîchissement et b) de rafraîchissement global dans le séjour-cuisine en journée	140
4.17	Évolution des courbes enveloppes des profils de température obtenus dans la zone de nuit pour chacune des variantes, la couleur la plus foncée représente la superposition des courbes enveloppes	141

4.18 Étude des risques et de la marge de manœuvre possible avec 14 actions testées dans la zone de nuit pour les deux variantes	142
4.19 Comparaison des indicateurs a) d'échauffement, b) d'échauffement global et c) de résilience dans la chambre 1 durant la nuit	144
4.20 Comparaison des indicateurs a) de rafraîchissement et b) de rafraîchissement global dans la chambre 1 durant la nuit	145

Nomenclature

Lettres majuscules

Notation	Unité	Signification
M	[W]	Taux métabolique
N	[-]	Nombre d'intervalles
O_i	[°C]	Température d'air observée
P_i	[°C]	Température d'air prédite
R^2	[-]	Coefficient de détermination
S	[W]	Chaleur sensible dégagée
S_i	[-]	Indice de sensibilité du premier ordre
S_{T_i}	[-]	Indice de sensibilité total
T	[°C]	Température d'air de la zone
T_a	[°C]	Température de l'air ambiant
T_C	[°C]	Température de confort pour les bâtiments non climatisés
T_{op}	[°C]	Température opérative
\bar{T}_r	[°C]	Température moyenne de rayonnement
T_{RM7}	[°C]	Température moyenne glissante sur sept jours
V	[°C ²]	Variance totale
V_i	[°C ²]	Variance partielle
V_i^*	[°C ²]	Variance partielle signée

Abréviations

Notation	Signification
3D	Trois-Dimensions
AFNOR	Association Française de NORmalisation
AIE	Agence Internationale de l'Énergie
ANOVA	ANalysis Of VAriance
AS	Analyse de Sensibilité
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BBC	Bâtiment Basse Consommation
COMEPOS	Conception et Construction Optimisée de Maisons à Énergie POSitive
CTF	Conduction Transfert Functions
CVC	Chauffage Ventilation Climatisation
ECS	Eau Chaude Sanitaire
EFAST	Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test
FAST	Fourier Amplitude Sensitivity Test
GEIC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
ITE	Isolation Thermique Extérieure
ITI	Isolation Thermique Intérieure
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LCA-FFB	Les Constructeurs et Aménageurs de la Fédération Française du Bâtiment
LHS	Latin Hypercube Sampling
OAT	One At a Time
PDD	Predicted Percentage of Dissatisfied
PMV	Predicted Mean Vote
QAI	Qualité de l'Air Intérieur
RBD-FAST	Random Balance Design - Fourier Amplitude Sensitivity Test
RMSE	Root Mean Square Error
RT	Réglementation Thermique
STD	Simulation Thermique Dynamique
VMC	Ventilation Mécanique Contrôlée

Opérateurs et fonctions

Notation	Signification
$Cov(.)$	Covariance mathématique
$E(.)$	Espérance mathématique
$echauffement(.)$	Indicateur d'échauffement
$echauffementglobal(.)$	Indicateur d'échauffement global
$f(.)$	Modèle générique
$P(.)$	Probabilité de réalisation d'un évènement
$PCC(.)$	Partial Correlation Coefficient
$PEAR(.)$	Coefficient de Pearson
$PRCC(.)$	Partial Ranked Correlation Coefficient
$rafraichissement(.)$	Indicateur de rafraîchissement
$rafraichissementglobal(.)$	Indicateur de rafraîchissement global
$resilience(.)$	Indicateur de résilience
$SPEA(.)$	Coefficient de Spearman
$SRC(.)$	Standard Regression Coefficient
$SRRC(.)$	Standard Ranked Regression Coefficient
$V(.)$	Variance mathématique

Lettres minuscules

Notation	Unité	Signification
$f_{convection}$	[-]	Part de chaleur sensible échangée par convection
$f_{latente}$	[-]	Part de chaleur latente échangée
f_{perdue}	[-]	Part de chaleur perdue
$f_{radiante}$	[-]	Part de chaleur sensible échangée par rayonnement
h_c	[W/m ² .K]	coefficient d'échange convectif
h_r	[W/m ² .K]	coefficient d'échange radiatif
i	[-]	Relatif à une action
n	[-]	Nombre d'observations
r	[-]	Coefficient de Spearman
t_0	[h]	Première heure de la période d'étude
t_k	[h]	k -ème heure de la période d'étude
t_{max}	[h]	Dernière heure de la période d'étude
t_p	[h]	p -ème heure de la période d'étude
x	[-]	Variable associée à une action

Lettres grecques

Notation	Unité	Signification
β	[-]	Coefficients d'un modèle de régression linéaire
σ	[-]	Écart-type
ρ	[-]	Coefficient de Pearson

Introduction générale

D'après le dernier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat sorti en 2018 ([GEIC \(2018\)](#)), l'augmentation des températures moyennes, l'élévation des températures maximales et la hausse de fréquence et d'intensité des vagues de chaleur sont autant d'effets observés et attendus du changement climatique. Sur le territoire français, les effets du dérèglement climatique (vagues de chaleur...) se font également ressentir. En sachant que l'utilisation de climatiseurs et de ventilateurs électriques pour le rafraîchissement représente déjà près de 20% de l'électricité totale utilisée dans les bâtiments du monde entier ([Agence Internationale de l'Énergie \(2018\)](#)), la gestion du confort d'été dans les bâtiments devient alors un enjeu stratégique.

En phase de conception, la rationalisation des solutions purement architecturales a permis d'aboutir au concept de bâtiments passifs optimisés pour réduire la consommation énergétique mais également pensés pour favoriser des températures intérieures confortables. Cependant, les performances atteintes dans tout bâtiment restent contraintes par les attentes de vie et les habitudes comportementales des occupants. Alors, une fois que le bâtiment est occupé, il nécessite une gestion active et économe de la part des occupants. Il est alors indispensable de repenser le bâtiment avec l'occupant au centre de la gestion du confort et de comprendre l'influence de ses comportements sur la réponse thermique du bâtiment.

La motivation de ce travail de thèse est alors d'apporter une méthodologie permettant de quantifier l'influence d'actions des occupants sur la réponse thermique d'un bâtiment. Elle permet de décorrélérer l'impact de chaque action sur la température à l'intérieur du bâtiment mais également de l'impact des sollicitations externes (conditions météorologiques). Ces travaux de thèse se concentrent sur les applications possibles pour des maisons individuelles dans le cadre de la gestion du confort d'été.

Le premier chapitre de ce manuscrit expose les divers éléments, dont les habitants,

influant sur la réponse thermique d'un bâtiment. La multitude des éléments influant complexifie alors la compréhension des effets et des impacts de chacune des actions des habitants. Dans la deuxième partie de ce chapitre, différents travaux sur la mesure du confort thermique sont présentés. Le nombre croissant d'indicateurs d'inconfort apparaissant au fil du temps dans la littérature montre l'intérêt grandissant pour cette thématique. Encore une fois, l'occupant est au centre des enjeux. La méthodologie proposée doit alors être capable d'isoler l'influence de chaque action des habitants sur la température et d'aboutir à une meilleure gestion du confort d'été grâce à ces actions.

Dans le deuxième chapitre, les outils numériques et statistiques déployés dans la méthodologie sont présentés. Il s'agit des outils de simulation thermique dynamique ainsi que de l'analyse de sensibilité. Des méthodes d'échantillonnage sont également présentées. Les différents travaux présentés permettent de retenir une démarche adaptée à la problématique de gestion du confort thermique : l'analyse de sensibilité temporelle couplée à la simulation thermique dynamique.

La méthodologie développée est détaillée dans le troisième chapitre de ce manuscrit. Pour mieux illustrer les différentes étapes qui la composent, elle est déroulée sur une maison individuelle située en région parisienne faisant partie du projet COMEPOS¹. En 2018, cette région a connu une période de vague de chaleur. Cette période sera utilisée pour étudier la gestion du confort thermique à l'intérieur de ce bâtiment. La méthodologie aboutit à la création d'indicateurs permettant d'agrèger les multiples résultats fournis par les analyses de sensibilité temporelle.

Le dernier chapitre regroupe deux applications de la méthodologie. Avec la première application, nous avons cherché à évaluer le rôle de l'inertie des parois d'une maison, celle utilisée dans le précédent chapitre, sur le confort d'été. La deuxième application porte sur le type de gestion de la ventilation nocturne : mécanique ou naturelle. Nous avons alors cherché à étudier, grâce à la méthodologie, la réaction des deux variantes de conception, à faible et à forte inertie, après l'introduction d'actions relatives à la ventilation naturelle dans l'habitation.

1. Le projet COMEPOS consiste à développer le concept de maison individuelle à énergie positive tous usages

1

L'habitant partenaire de la performance du bâtiment

Ce premier chapitre présente les éléments influençant le comportement (la réponse thermique) d'un bâtiment. Il en ressort que les occupants par leur présence, leurs activités et leurs actions sur l'enveloppe et les systèmes du bâtiment influent fortement sur cette performance. Afin de gagner en confort et d'améliorer la gestion des énergies au quotidien, un levier possible est la domotique. Il s'agit de technologies et de stratégies de contrôle conçues pour effectuer des tâches de manière plus fiable et efficace que les occupants. Les limites de la domotique sont alors présentées et ramènent l'habitant au centre de la gestion du bâtiment. Dans la deuxième partie de ce chapitre, on rappelle le nouvel enjeu qu'est le confort d'été dans les bâtiments et les différentes mesures du confort thermique. Encore une fois, l'occupant est au centre des enjeux. Les observations faites amènent à mieux comprendre l'impact des actions des occupants sur la performance d'un bâtiment et à étudier l'influence d'actions ciblées.

Sommaire

1.1 Interactions à l'échelle d'un bâtiment	5
1.2 Complémentarité entre les actions de l'habitant et la domotique . .	8
1.3 Relation entre le confort et l'occupant	11
1.3.1 Le confort d'été, un enjeu majeur dans le bâtiment	11
1.3.2 Évaluation du confort thermique à l'intérieur d'un bâtiment . .	14
1.4 Objectif : l'habitant partenaire de la performance du bâtiment . . .	19

1.1 Interactions à l'échelle d'un bâtiment

Dans les bâtiments résidentiels, la performance atteinte par un bâtiment se mesure habituellement en termes de consommation énergétique pour les postes de chauffage, de climatisation, d'eau chaude sanitaire (ECS), d'éclairage intérieur et de consommation des auxiliaires (pompes et ventilateurs) et en termes de confort thermique quand le bâtiment ne dispose pas de système de climatisation. La performance ou plutôt les performances d'un bâtiment sont ainsi physiquement liées à l'efficacité des systèmes de chauffage, de production d'ECS et de ventilation mécanique contrôlée (VMC) installés et à leurs organes de régulation et de pilotage. Elles sont également reliées à la performance de l'enveloppe isolante du bâtiment, à la rigueur climatique à laquelle il est soumis, à l'environnement dans lequel il se situe (micro-climat urbain, masque proche, masque lointain) mais aussi à la présence et au mode de vie des occupants dans le bâtiment. La Figure 1.1 permet de visualiser différents éléments qui influent sur les performances d'un bâtiment résidentiel.

La multitude des éléments influant sur les performances d'un bâtiment complexifie alors la compréhension des effets et des impacts de chaque aspect sur ses performances.

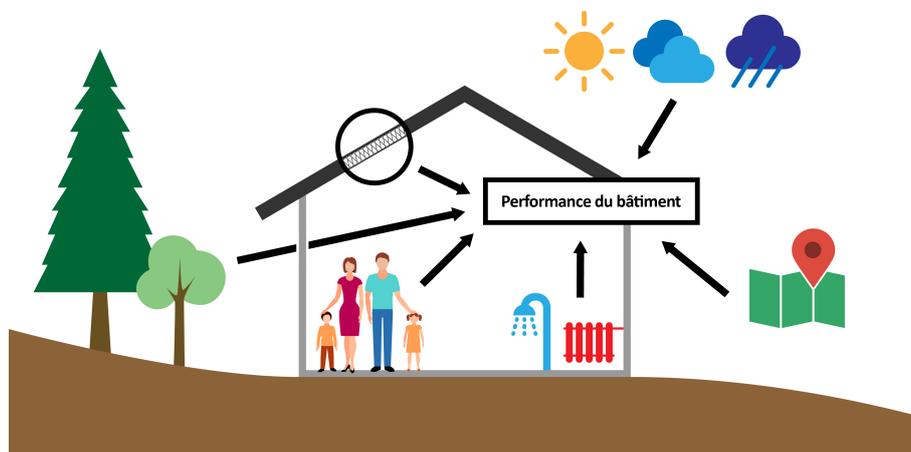


Figure 1.1 – Vision holistique d'éléments pouvant influencer sur les performances d'un bâtiment résidentiel comme l'efficacité des systèmes installés, l'enveloppe du bâtiment, le climat, l'environnement proche et lointain ou les occupants

Les habitants peuvent influencer par leurs activités, leurs actions et leur présence sur les phénomènes couplés de transfert de chaleur, d'humidité et d'air à l'intérieur d'un bâtiment. Les principales interactions entre les modes de transferts précédemment cités et le comportement des habitants sont présentées sur la Figure 1.2.

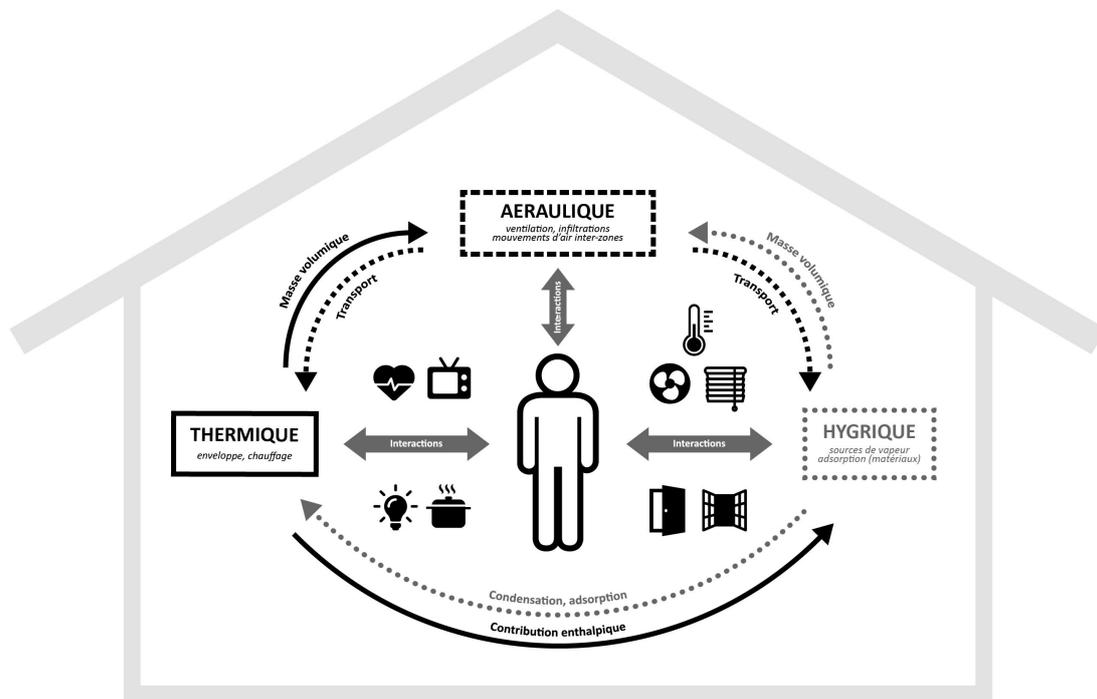


Figure 1.2 – Interactions des habitants dans les phénomènes couplés thermo-hygro-aérauliques dans le bâtiment, schéma adapté de [Woloszyn \(1999\)](#)

Les échanges thermo-hygro-aérauliques dans un bâtiment sont alors dépendants de :

- la présence des occupants : le corps humain échangeant de la chaleur sensible et latente avec son environnement,
- l'interaction des occupants avec l'enveloppe du bâtiment : l'ouverture des portes et des fenêtres permettent l'introduction et la circulation d'air dans l'habitat à une température et un taux d'humidité relative, l'ouverture des volets/des rideaux influe sur la quantité de rayonnement solaire rentrante dans l'habitat,
- l'interaction des occupants avec les systèmes de chauffage, ventilation ou climatisation : la température à l'intérieur du logement est directement impactée par la température de consigne de chauffage ou de climatisation, la gestion de la ventilation par les occupants influe sur le taux de renouvellement d'air provenant de l'extérieur,
- l'utilisation par les occupants de l'éclairage artificiel,
- et des activités des occupants : la cuisine, le ménage, l'utilisation d'équipements audiovisuels, etc. sont autant d'activités dégageant de la chaleur et/ou de l'humidité.

L'étude menée par [Andersen \(2012\)](#) donne un très bon aperçu de l'impact que peuvent

avoir les habitants sur la consommation d'énergie dans les bâtiments résidentiels. À l'aide de 4 années de factures de chauffage, l'auteur a étudié les consommations de 290 maisons identiques toutes situées dans la même banlieue de Copenhague, au Danemark. Les valeurs de consommation relevées vont de 9.7 kWh/m² à 197 kWh/m² et sont visibles sur la Figure 1.3. Les écarts sont alors dus d'une part aux différences de comportements entre les habitants et d'autre part, aux différences d'attentes en termes de confort.

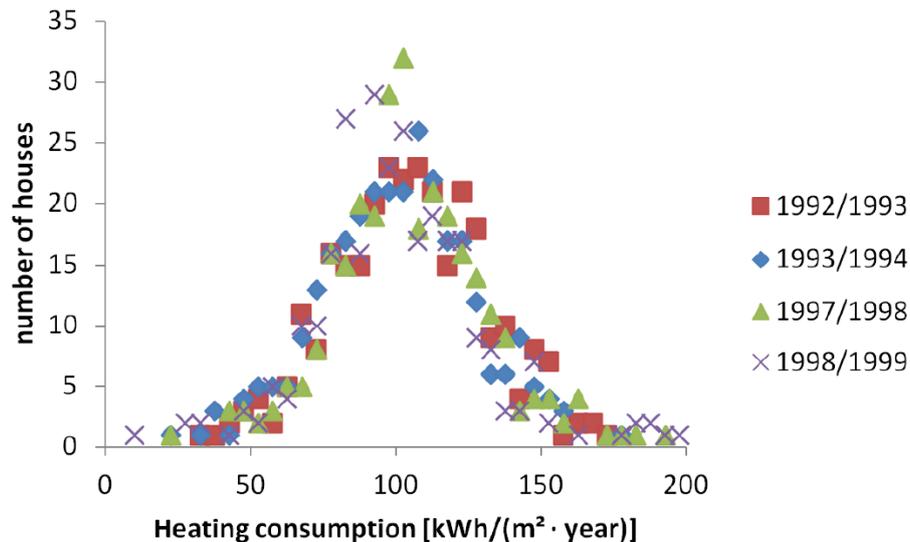


Figure 1.3 – Exemple de quantification de l'impact des habitants sur la consommation de chauffage pour des bâtiments identiques réalisée par Andersen (2012)

Pour concevoir des bâtiments performants, il est possible de jouer sur deux leviers (1.4). Le premier levier sur lequel les acteurs (architectes, constructeurs, etc.) peuvent intervenir est la construction du bâtiment en lui-même. Ainsi, des matériaux à forte capacité isolante, le choix de l'orientation du bâti ou la prescription d'équipements au rendement énergétique élevé sont autant d'éléments de conception nécessaires pour parvenir à réduire la consommation énergétique d'un bâtiment. La rationalisation des solutions purement architecturales a permis d'aboutir au concept de bâtiments passifs grâce à une conception architecturale réfléchie pour valoriser les apports gratuits externes et internes (conception bioclimatique) une isolation renforcée de l'enveloppe (isolants performants et traitement des ponts thermiques) et une maîtrise des flux d'air : étanchéité à l'air travaillée et ventilation contrôlée. Un design soigné est alors nécessaire mais pas suffisant d'après (Janda (2011)) pour qui la conception la plus minutieuse qui soit reste sujette aux attentes et aux habitudes de consommations des occupants.

Durant la phase d'occupation, afin d'être efficace énergétiquement parlant, les bâtiments nécessitent également une gestion active et économe de la part des habitants car, comme vu précédemment, leur présence et leurs actions sont sources d'échanges thermo-

hygro-aérauliques qui peuvent améliorer ou réduire la performance énergétique d'un bâtiment. Le deuxième levier d'intervention possible repose alors sur une gestion technologique intelligente ou gestion active du bâtiment pour optimiser les performances du bâtiment en termes de consommation énergétique et de confort thermique. Dans les bâtiments tertiaires, on parle alors fréquemment de GTB (Gestion Technique du Bâtiment). Dans les bâtiments résidentiels, le concept de maison intelligente fait appel à la domotique regroupant un ensemble de technologies et de stratégies de contrôle conçues pour effectuer des tâches de manière plus fiable et efficace que les occupants.



Figure 1.4 – Leviers qui peuvent être activés pour contribuer à la performance énergétique des bâtiments : les solutions passives et les solutions actives. (IdelecPlus (2017))

1.2 Complémentarité entre les actions de l'habitant et la domotique

Aujourd'hui, des fabricants de domotique proposent des systèmes complets associant de multiples fonctionnalités allant de la gestion des équipements CVC (Chauffage, Ventilation, Climatisation) au système d'alarme dans un bâtiment. Différentes fonctionnalités permises par la domotique sont présentées sur la Figure 1.5. Le développement de la domotique dans les bâtiments résidentiels permettrait alors de gagner en confort et d'améliorer la gestion des énergies au quotidien grâce à l'optimisation de la gestion du chauffage, de l'éclairage, de la sécurité, des accès et ouvertures de la maison.

Cette gestion efficace repose alors sur un réseau de capteurs et d'actionneurs communicants et pilotables par une centrale de commande. Cette centrale intègre un modèle mathématique simplifié du bâtiment et de ses équipements lui permettant de prédire et d'optimiser le pilotage des équipements pour atteindre les objectifs fixés. Du point de vue théorique, la gestion active du bâtiment grâce à la domotique pour améliorer la perfor-

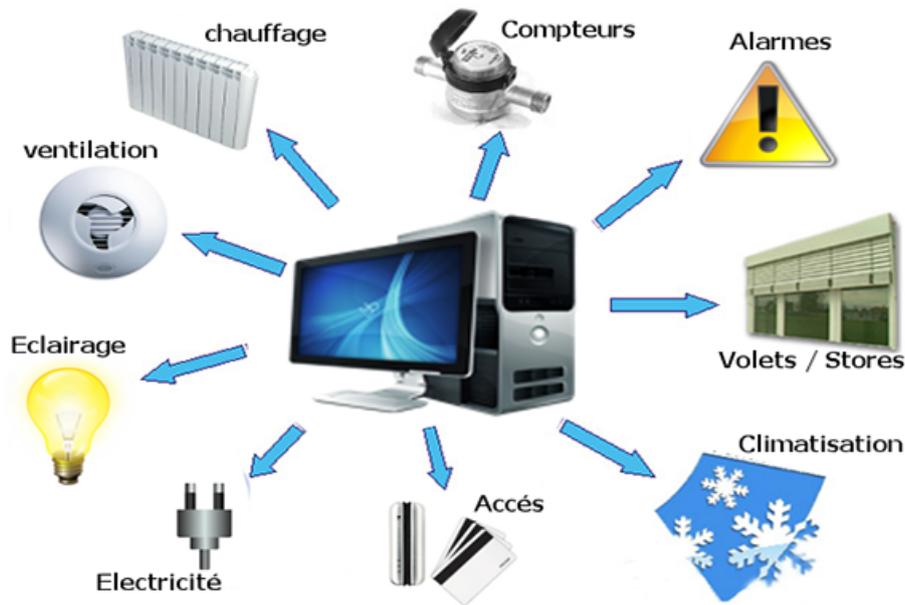


Figure 1.5 – Présentation de quelques fonctionnalités offertes par la domotique, SWATEK (2017)

mance d'un bâtiment est prometteuse. Cependant, des limites à la domotique existent.

Dans un premier temps, il faut rappeler que ces technologies consomment de l'énergie et supposent des comptages et des mesures fiables dans le temps ce qui, dans des bâtiments occupés, reste un verrou technologique.

D'autre part, des retours d'expériences (Brisepierre et Roche (2013), Brown *et al.* (2009)) montrent que ces solutions techniques connaissent des limites en termes d'acceptation et d'appropriation par les occupants. En effet, les habitants peuvent ne pas comprendre le fonctionnement du système et même avoir le sentiment qu'ils doivent se battre contre leur maison pour atteindre leurs objectifs. Un exemple typique de cette situation est un occupant qui ferme les stores pour adapter les conditions d'éclairage pour regarder la télévision. En conséquence, le système allume automatiquement les lumières car la pièce est trop sombre, ce qui peut être inapproprié. De plus, quelques minutes plus tard, le système de contrôle peut rouvrir les stores pour chauffer la pièce par une journée ensoleillée d'hiver (Alzouhri Alyafi (2019)). Bien que la domotique doit être intelligente et complète du point de vue de la physique, elle ne peut tenir compte des facteurs humains tels que les intentions. D'après Alzouhri Alyafi (2019), il est clair que le paradigme de la domotique qui consiste à « agir à la place des occupants » risque de ne pas être atteint car le système ne pourra pas comprendre ni les objectifs ni les besoins des occupants.

Ainsi, d'après Brisepierre et Roche (2013), les occupants n'appliquent jamais à la lettre les consignes des concepteurs, ils ont leur propre façon d'habiter. Pour rallier les

habitants aux objectifs des concepteurs, il ne sert à rien de leur expliquer comment vivre, il faut leur donner le sens des choix de conception, des clés de compréhension du comportement thermique et de leur impact afin de les aider à inventer des tactiques de compromis avec leurs besoins.

Pour appuyer des campagnes d'incitation, de sensibilisation et d'éducation des habitants il est alors utile d'être en mesure de quantifier l'impact de chaque action des habitants sur la consommation d'énergie ou sur le confort dans son habitat. Puisque les dispositifs techniques issus de la domotique ne suffisent pas seuls à générer le comportement économique attendu chez les habitants, il faut les impliquer dans ce processus et leur montrer l'impact de chaque action sur la performance finale du bâtiment.

La performance d'un bâtiment résidentiel en phase occupation (*in vivo*) dépend alors des interactions entre les choix de conception, les modes de gestion et les usages des occupants comme décrit sur la Figure 1.6.

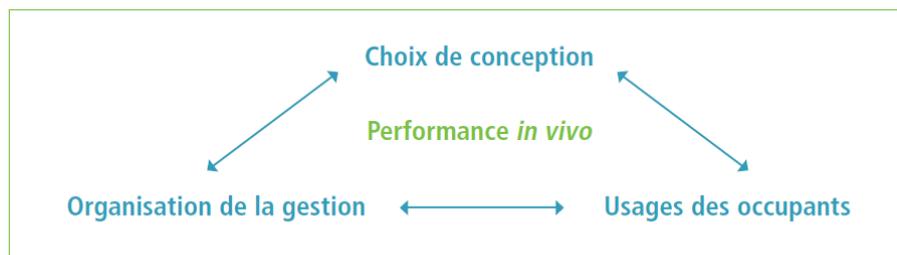


Figure 1.6 – Interaction en jeu dans la performance *in vivo* d'un bâtiment d'après [Brisepierre et Roche \(2013\)](#)

Lorsque la performance *in vivo* reflète le comportement thermique du bâtiment. En hiver, en France métropolitaine, cela se traduit par les consommations de chauffage. En été, c'est la capacité du bâtiment à assurer le confort thermique qui est l'indicateur de performance. Cet indicateur est par nature fortement relié à l'occupant.

1.3 Relation entre le confort et l'occupant

1.3.1 Le confort d'été, un enjeu majeur dans le bâtiment

D'après le dernier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GEIC (2018)), l'augmentation des températures moyennes, l'élévation des températures maximales et la hausse de fréquence et d'intensité des vagues de chaleur sont autant d'effets observés et attendus du changement climatique. Sur le territoire fran-

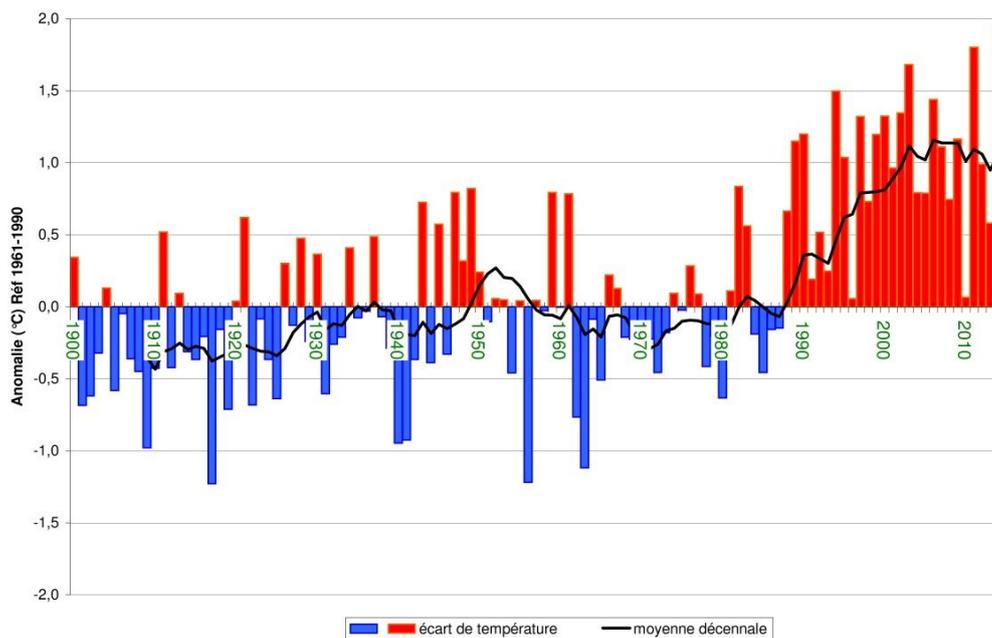


Figure 1.7 – Anomalie de la température moyenne annuelle de l'air, en surface, par rapport à la normale de référence : température moyenne en France (l'indicateur est constitué de la moyenne des températures de 30 stations météorologiques. Le zéro correspond à la moyenne de l'indicateur sur la période 1981-2010, soit 12,5 °C) (MétéoFrance (2018a))

çais, les effets du dérèglement climatique se font également ressentir comme le montre la Figure 1.7 sur laquelle on observe que les écarts de températures moyennes relevées en France par rapport à la normale de référence sont toujours positifs ces dernières années.

Sur la base du recensement des vagues de chaleur depuis 1947, il apparaît clairement sur la Figure 1.9 que la fréquence et l'intensité de ces événements a augmenté au cours des trente dernières années. Pour qualifier un événement de « vague de chaleur », Météo-France s'appuie sur les données de l'indicateur thermique national (une moyenne de 30 stations régulièrement réparties sur le territoire) disponibles depuis 1947. Les climatologues observent un pic de chaleur, correspondant au dépassement d'une température moyenne très élevée sur la France (valeur franchie statistiquement une fois tous les 200

Pour limiter le recours à la climatisation et donc limiter la consommation énergétique dans un bâtiment pour les années présentes et futures, la gestion du confort d'été est un enjeu stratégique car d'après l'[Agence Internationale de l'Énergie \(2018\)](#), l'utilisation de climatiseurs et de ventilateurs électriques pour le rafraîchissement représente déjà près de 20% de l'électricité totale utilisée dans les bâtiments du monde entier. Sous des climats plus froids, la prise en compte du réchauffement climatique permet de proposer des solutions de rénovations de bâtiments adaptées au futur climat ([Nik et al. \(2016\)](#)).

Le confort thermique à l'intérieur d'un bâtiment sans système de climatisation est dépendant de la réponse thermique du bâtiment aux diverses sollicitations internes et externes, aux interactions bâti-habitant-domotique mais également aux individus eux-mêmes tant le confort est subjectif et propre à chacun. Le confort thermique n'étant qu'un élément parmi d'autres (confort matériel, existentiel, social, etc.) qui participe à la définition du bien-être. « *Le confort est lié aux sentiments, à la perception, à l'humeur et à la situation. Sa définition fait à la fois appel à une approche négative (absence d'inconfort, qui se caractérise par exemple par l'absence de douleur, d'anxiété, . . .) et à une approche positive (bien-être, satisfaction).* » ([Moser \(2009\)](#))

1.3.2 Évaluation du confort thermique à l'intérieur d'un bâtiment

Le confort thermique étant subjectif, il est alors difficile de le mesurer et de l'évaluer aisément à l'intérieur d'un bâtiment.

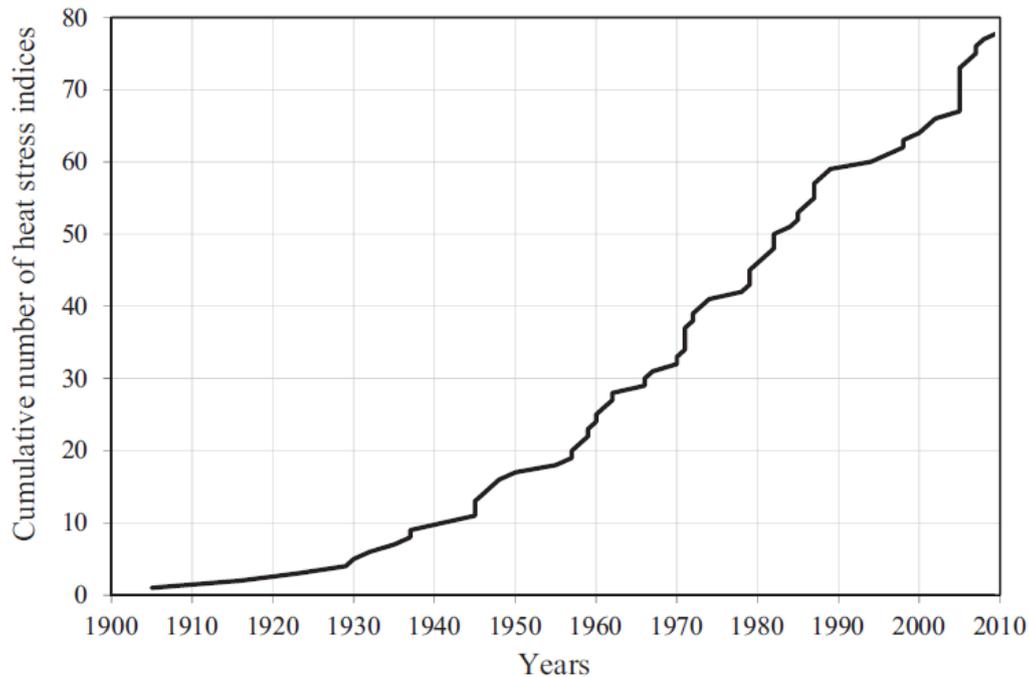


Figure 1.10 – Nombre cumulé d'indices de confort apparaissant dans la littérature au cours du temps [Carlucci et Pagliano \(2012\)](#)

Depuis de nombreuses années, des méthodes d'estimation du confort thermique ont été développées comme le montre la Figure 1.10 où le nombre d'indicateur d'inconfort apparaissant dans les publications scientifiques au fil des années a été tracé ce qui montre l'engouement pour cette thématique mais également la difficulté de la caractérisation du confort thermique.

Pour évaluer le confort thermique, de multiples modèles de caractérisation du confort cherchent à modéliser les échanges thermiques entre l'homme et son environnement. Pour cela, ils prennent en compte des facteurs environnementaux mais également des différences individuelles. L'environnement thermique peut être défini suivant quatre paramètres :

- la température de l'air,
- la température des parois qui entourent l'individu,
- l'humidité de l'air,
- et la vitesse de l'air.

Ces facteurs sont souvent combinés avec :

- l'activité,
- et la vêtue de l'individu.

Cette évaluation du confort au niveau de l'ambiance peut être complétée par des conditions de confort plus locales. La norme [ISO 7730 \(2006\)](#) précise des limites à respecter concernant les courants d'air, la dissymétrie de la température radiante, les gradients de température verticaux et les températures du plancher. Cette évaluation peut permettre de détecter des situations d'inconfort local.

Plus généralement, des évaluations globales du confort dans un bâtiment sont réalisées. Fréquemment, ces évaluations reposent sur la méthode de Fanger ou sur la théorie du confort adaptatif.

La méthode proposée par [Fanger \(1967\)](#) se base sur l'évaluation de la sensation de confort dans une ambiance contrôlée où un certain nombre de paramètres sont estimés (habillement, métabolisme (activité), température, humidité, vitesse d'air). L'indice PMV (Predicted Mean Vote) se base sur une évaluation de la sensation de confort obtenue dans des chambres climatisées. Le modèle a été créé à partir de corrélations issues du croisement des données de base des occupants, des données sur l'ambiance et des réponses des occupants sur leur état de confort. Pour une situation donnée, le confort est estimé entre -3 (très froid) et +3 (très chaud) où 0 est l'optimum (ni chaud, ni froid). Le PMV peut alors être calculé à partir des paramètres de l'environnement thermique et de l'activité et de la vêtue des occupants. Le PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) ou Pourcentage Prévisible d'Insatisfaites est l'extension statistique du nombre de personnes insatisfaites pour un indice PMV variant de 5 % (PMV de 0) à 100 %. Ainsi même pour une situation idéale du point de vue du PMV (vote égal à 0) il y aura toujours des personnes insatisfaites. L'indice PPD se calcule à partir de l'indice PMV mais peut être retrouvé grâce à la courbe présentée sur la [Figure 1.11](#)

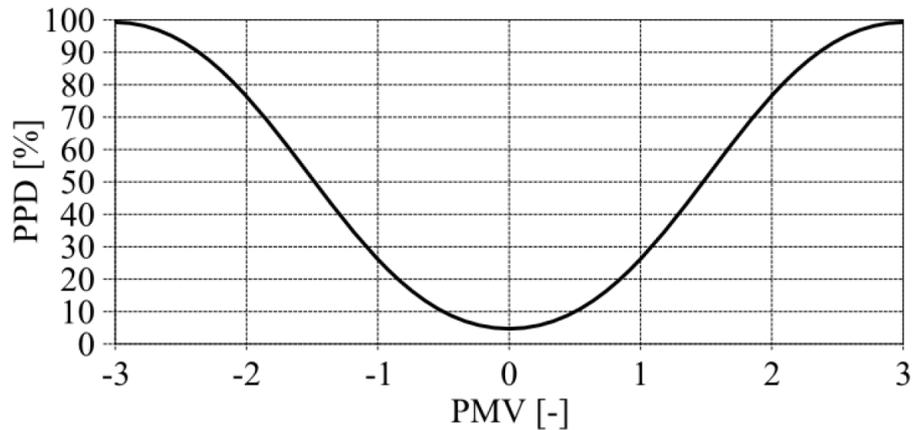
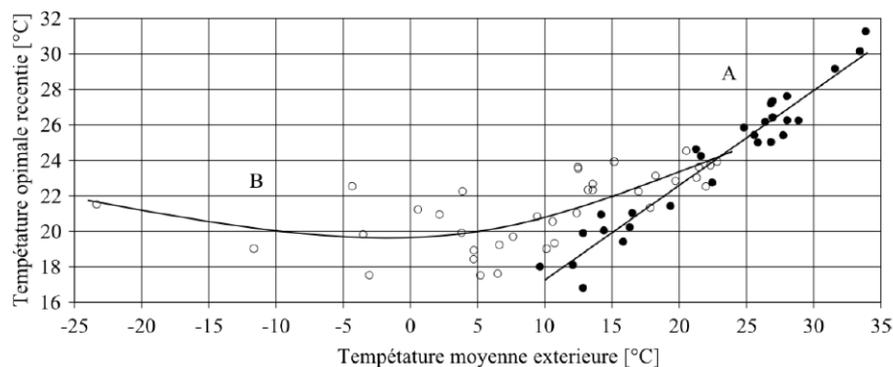


Figure 1.11 – Détermination de la valeur du PPD en pourcentage en fonction de l'indice PMV

Les méthodes basées sur le confort adaptatif tiennent compte de l'hypothèse que la condition de confort des occupants dépend grandement du contexte, du comportement des occupants et de leurs attentes. Cette méthode est particulièrement utilisée dans les bâtiments résidentiels dans lesquels les habitants s'adapteront (habillement, posture, métabolisme, activité, ...) aux variations climatiques s'ils en ont les moyens avec notamment un accès libre aux ouvrants. Dans un logement réel et naturellement ventilé, les conditions de confort sont alors plus larges et dépendent principalement de la température extérieure (Nicol et Humphreys (2002)). Dans leur étude, il a été montré grâce à des campagnes de mesure qu'une température optimale de confort pouvait être estimée par une relation linéaire avec la température moyenne mensuelle extérieure dans le cas des bâtiments ventilés naturellement et dans le cas des bâtiments dont l'ambiance est conditionnée par des systèmes. Les relations retrouvées se trouvent sur la Figure 1.12.

Figure 1.12 – Relation entre la température optimale dans un bâtiment et la température extérieure (Nicol et Humphreys (2002))

- (A) bâtiments en évolution libre
- (B) bâtiments conditionnés par un système



Dans son état de l'art sur le confort adaptatif, [Bonte \(2014\)](#) montre qu'il existe de nombreuses autres études ([McCartney et Fergus Nicol \(2002\)](#), [De Dear et Brager \(2002\)](#), [Peeters *et al.* \(2009\)](#)) qui tentent de définir une température de confort en fonction de la température extérieure. Les relations retrouvées par ces différentes études diffèrent par la localisation géographique et la destination des bâtiments (logement, administratif, école, etc.) dans lesquels les campagnes de mesure ont lieu pour retrouver les relations.

Un point semble être commun à ces études, il s'agit de la définition de la température de confort. La température de confort est en effet fréquemment assimilée à la température opérative et est souvent reprise dans les normes. La température opérative est une moyenne des échanges par convection et par radiation entre l'être humain et son environnement comme définie par l'équation 1.1. Par rapport à une seule température d'air ou de rayonnement, elle permet la prise en compte des échanges de chaleur dans des environnements non-uniformes réels. Les échanges par conduction sont négligés et l'humidité de l'air n'est pas prise en compte.

$$T_{op} = \frac{h_r \cdot \bar{T}_r + h_c \cdot T_a}{h_r + h_c} \quad (1.1)$$

avec T_{op} la température opérative intérieure, h_r et h_c les coefficients de transfert thermique respectivement par rayonnement et par convection, \bar{T}_r la température moyenne de rayonnement et T_a la température de l'air ambiant.

Il existe plusieurs normes nationales et internationales ainsi que des rapports techniques qui spécifient des critères de confort thermique et de qualité de l'air ([ISO 7730 \(2006\)](#), [ASHRAE Standard 55 \(1992\)](#)). Ces normes spécifient différents types et catégories de critères qui peuvent avoir une influence significative sur la demande d'énergie. Pour l'ambiance thermique, des critères pour la saison de chauffage (saison froide/hiver) et pour la saison de rafraîchissement (saison chaude/été) sont énumérés. La norme [NF EN 15251 \(2007\)](#) définit une température intérieure de confort qui se calcule pour chaque jour et qui est définie à partir de la température moyenne journalière glissante sur sept jours. Les températures intérieures acceptables « en été » sont présentées pour les bâtiments non climatisés à la Figure 1.13. Les différents intervalles de températures (I, II et III) correspondent à différents niveaux d'attente en termes de confort thermique. La norme définit chacune des catégories (Figure 1.14).

Les températures opératives présentées sont valables, d'après la norme « pour des immeubles de bureaux ou autres bâtiments de types similaires destinés essentiellement à l'occupation humaine avec des activités essentiellement sédentaires et des pièces où il est facile d'accéder à des fenêtres ouvrables et où les occupants peuvent librement adap-

ter leurs vêtements aux conditions thermiques intérieures et/ou extérieures. » Les limites de températures admises par la norme sont essentiellement basées sur des études menées dans des bâtiments de bureaux. Cependant, toujours d'après cette norme, les limites présentées peuvent s'appliquer à des logements car l'activité des occupants y est principalement sédentaire.

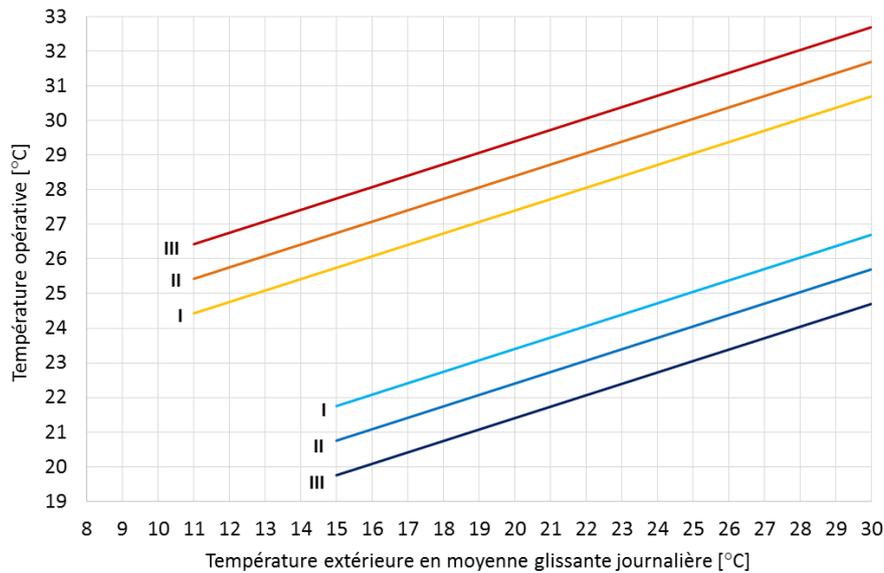


Figure 1.13 – Valeurs de base de la température opérative intérieure pour des bâtiments non climatisés en fonction d'une température extérieure en moyenne glissante pondérée exponentiellement, extrait de la norme [NF EN 15251 \(2007\)](#)

Catégorie	Explication
I	Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.
II	Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.
III	Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants.
IV	Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus. Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année.

Figure 1.14 – Tableau décrivant l'application des catégories utilisées, extrait de la norme [NF EN 15251 \(2007\)](#)

Tous ces travaux, réalisés à partir de données empiriques, donnent un cadre à la mesure et à l'évaluation du confort thermique et ouvrent la voie au diagnostic du confort dans les bâtiments en phase de conception et en phase occupation. Des méthodes permettent alors d'étudier l'influence du comportement des habitants sur le confort thermique pour un bâtiment présentant un risque d'inconfort.

1.4 Objectif : l'habitant partenaire de la performance du bâtiment

Pour étudier l'influence du comportement des habitants sur les performances d'un bâtiment, que ce soit la consommation énergétique ou le confort, la méthode classique consiste à regarder la performance obtenue pour différents scénarios de comportements dans ce même bâtiment. Grâce à des mesures, [Andersen \(2012\)](#) a à sa disposition les données de consommations de 290 maisons identiques, il a donc pu étudier pour ce modèle de maison l'influence des occupants sur la consommation énergétique en regardant la dispersion de la consommation en fonction des 290 comportements sans distinction possible entre les actions ([Figure 1.3](#)). La caractérisation de l'impact de la présence ou de l'action de l'habitant sur la performance du bâtiment à l'aide de données expérimentales se fait majoritairement par la recherche d'une courbe de tendance entre intensité de l'action et performance du bâtiment mesurées ([Martani et al. \(2012\)](#), [Howard-Reed et al. \(2002\)](#)). Cependant, ce genre de données expérimentales reste rare, la plupart des travaux s'appuient aujourd'hui sur des outils de simulation.

Afin d'étudier les performances d'un bâtiment, des outils dédiés visent à reproduire le comportement thermo-hygro-aéraulique de celui-ci lorsqu'il est soumis à diverses sollicitations pour en déduire ses performances. En modifiant le comportement des habitants d'une simulation à l'autre, il est possible de calculer la consommation d'énergie ou la valeur de l'indicateur de confort retenu pour chacun des scénarios. Les scénarios ne doivent pas être sélectionnés au hasard et doivent correspondre à des comportements proches de la réalité dans le type de bâtiment étudié.

De cette manière, [Vorgler \(2014\)](#) a travaillé sur la modélisation du comportement des habitants et a pu évaluer la performance de bâtiments pour de multiples scénarios de comportements. Dans la [Figure 1.15](#), le résultat d'une de ses études sur la température intérieure est présenté. La dispersion de la température expliquée par le comportement des habitants est tracée.

Dans ces études, on ne regarde pas l'influence d'une action précise des habitants sur la performance du bâtiment mais d'un ensemble d'actions car dans chacun des scénarios de comportements se trouvent de multiples actions (température de consigne, ouverture des fenêtres, des volets, etc.). En limitant ce type d'étude à une seule action, le risque est de ne pas pouvoir conclure statistiquement sur la dispersion de la température induite par l'action retenue car on ne tient pas compte de la variabilité probable des autres actions qui influent elles-aussi sur la température d'un bâtiment. C'est l'ensemble des actions des

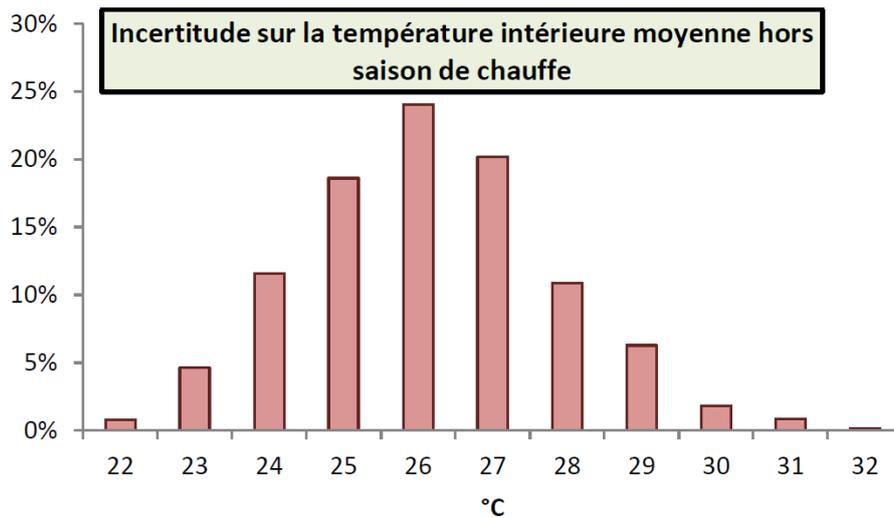


Figure 1.15 – Dispersion de la température intérieure en été sur une maison témoin avec 1000 scénarios de comportements simulés (Vorger (2014))

habitants qui est en interaction avec la réponse thermique du bâtiment.

Ainsi, ces travaux de thèse se sont intéressés au développement d'une méthodologie permettant de quantifier statistiquement l'influence d'actions ciblées des occupants sur la température à l'intérieur de maisons individuelles afin de repenser le bâtiment avec l'occupant au centre de la gestion du confort. Les objectifs scientifiques de cette thèse sont présentés à la fin du chapitre suivant (Chapitre 2) après la description de l'outil statistique communément employé pour répondre à cette problématique dans le domaine de l'étude de la performance de bâtiment.

2

D'une approche déterministe vers une approche statistique pour la description de la réponse thermique d'un bâtiment

Ce chapitre introduit les différents outils qui seront utilisés dans ces travaux. D'une part, les outils de simulation thermique dynamique qui permettent la modélisation de bâtiment incluant le comportement des occupants. D'autre part, des méthodes statistiques pour obtenir l'influence de chaque action de l'occupant sur le bâtiment. Une démarche complète adaptée à la problématique de gestion du confort thermique couplant l'analyse de sensibilité et le modèle numérique est retenue et détaillée dans ce chapitre.

Sommaire

2.1 Outils numériques pour étudier la réponse thermique d'un bâtiment	25
2.1.1 Simulation thermique dynamique de bâtiment	25
2.1.2 Reproduction du comportement des occupants	27
2.1.3 Limites de l'approche classique	29
2.2 Outils statistiques pour la quantification des impacts des habitants	31
2.2.1 Méthodes d'analyse de sensibilité	31
2.2.2 Méthodes d'échantillonnage	39
2.2.3 Analyses de sensibilité appliquées au bâtiment	44
2.3 Objectif scientifique du présent travail	52

2.1 Outils numériques pour étudier la réponse thermique d'un bâtiment

2.1.1 Simulation thermique dynamique de bâtiment

La modélisation énergétique de bâtiment consiste à approcher, à l'aide d'un modèle numérique, le comportement thermo-hygro-aéraulique de celui-ci lorsqu'il est soumis à des sollicitations. Il est ainsi possible de réaliser à l'aide de ce modèle numérique de multiples « expériences » ou « simulations » pour lesquelles les paramètres d'entrée du modèle, comme les caractéristiques intrinsèques du bâtiment et des systèmes (matériaux, géométrie, rendement des systèmes, algorithme de pilotage et de régulation, etc.), les sollicitations internes comme le comportement des occupants (présence, gestions des ouvrants, etc.), l'environnement et les sollicitations externes (masque proche et lointain, conditions météorologiques, etc.) sont imposés et peuvent être modifiés au gré du modélisateur souhaitant évaluer la réponse du bâtiment ainsi modélisé.

Plus particulièrement, la modélisation qualifiée de « dynamique » permet de tenir compte des variations temporelles des sollicitations externes et internes afin d'obtenir les variables d'état de chaque « zone » du bâtiment au cours du temps : température, pression, humidité. Une zone correspond à la décomposition du bâtiment en volumes d'air comme schématisée sur la Figure 2.1. Les volumes d'air sont séparés entre eux ou de l'extérieur par des parois opaques et/ou vitrées et les variables d'état de chaque zone sont supposées homogènes au sein d'une même zone. On parle alors d'approche nodale et cette approche est la plus communément utilisée dans le domaine du bâtiment. Comme le rappelle [Peuportier \(2016\)](#), la modélisation détaillée de l'ensemble des phénomènes couplés d'un bâtiment (transfert de chaleur, d'humidité et transfert aéraulique) nécessiterait d'une part des compétences en modélisation élevées et d'autre part, engendrerait un temps de calcul excessif.

En fonction des objectifs de l'étude, la prise en compte de ces trois modes de transfert n'est pas indispensable. En simulation thermique dynamique (STD) de bâtiment, de nombreuses hypothèses simplificatrices sont adoptées afin d'obtenir les évolutions temporelles des variables d'état de chaque zone pour évaluer la performance du bâtiment. Par exemple, la majorité des outils de simulation thermique dynamique inclut les bilans d'humidité dans l'air et le transport par la ventilation mais sans prendre en compte les transferts hydriques dans les parois et le mobilier. Le transfert de chaleur par conduction à travers l'épaisseur des parois est supposé unidirectionnel. Lorsque la prise en compte des écoulements aérauliques est nécessaire, l'approche nodale de ce phénomène permet de décrire les mouvements d'air de manière simplifiée en assimilant les emplacements

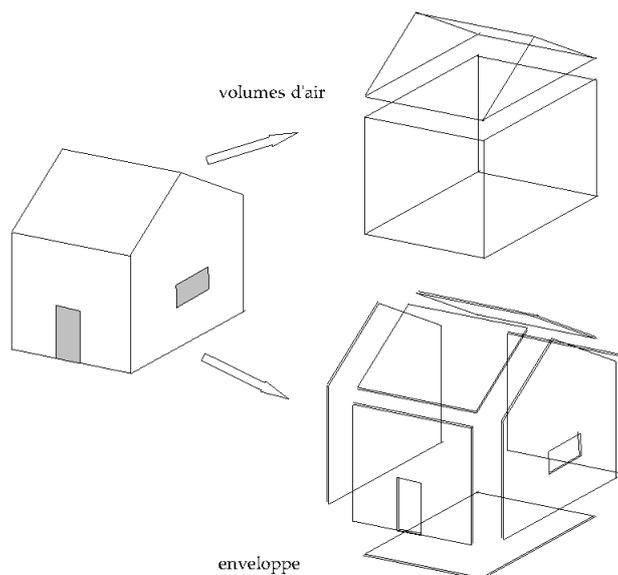


Figure 2.1 – Principe de découpage en deux volumes d'air d'un bâtiment et prise en compte des parois en simulation thermique dynamique tiré de [Peuportier \(2016\)](#)

stratégiques des mouvements d'air comme les portes, fenêtres ou fissures à des points et les différences de pression entre les points sont alors motrices lors des transferts de masse ([Trocmé \(2009\)](#)).

De nombreux outils de simulation thermique dynamique sont aujourd'hui disponibles ([Woloszyn et Rode \(2008\)](#)). Ils se distinguent par leurs fonctionnalités, les codes de calcul utilisés et la finesse de modélisation des phénomènes physiques. Parmi les fonctionnalités offertes par ces outils, il y a en a une commune à tous, la prise en compte des échanges thermiques dans le bâtiment. D'autres fonctionnalités ont déjà été évoquées comme la modélisation des échanges aérauliques, les transferts de masse et d'humidité ou encore la modélisation des systèmes CVC. On peut rajouter la prise en compte de l'éclairément, la possibilité de réaliser une analyse de cycle de vie du bâtiment, l'existence d'une interface graphique pour modéliser aisément la géométrie du bâtiment, etc. Parmi ces outils, EnergyPlus est un programme de simulation énergétique de bâtiment fréquemment utilisé.

Le programme regroupe de nombreux modules qui fonctionnent ensemble pour calculer les différentes échanges dans le bâtiment. La Figure 2.2 illustre la structure du programme. Le cœur de calcul s'appuie sur un modèle aux différences finies multizone. À chaque pas de temps, il détermine les besoins de chauffage, de refroidissement, l'humidité et les températures dans chaque zone du bâtiment. Le bilan thermique réalisé intègre les échanges entre zones. Les débits de ventilation naturelle peuvent être obtenus à partir d'un calcul des pressions dans les pièces en tenant compte de l'effet du vent et du tirage thermique grâce au module « AirFlow Network ».

Le développement de cet outil est coordonné par le laboratoire national Lawrence-Berkley (LBNL) qui est dépendant du Département de l'énergie des États-Unis. EnergyPlus est un logiciel open-source et est couramment utilisé dans la communauté de la simulation du bâtiment. Les entrées et les sorties du logiciel tiennent dans des fichiers ASCII (fichiers textes), favorisant l'automatisation des simulations. Il a fait l'objet de nombreuses validations pour lesquelles les rapports sont disponibles sur [EnergyPlus \(2019b\)](#).

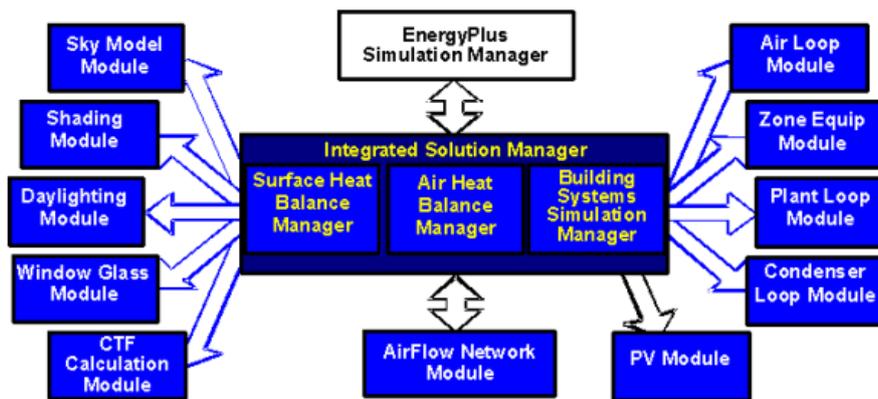


Figure 2.2 – Structure du logiciel EnergyPlus ([EnergyPlus \(2016\)](#))

Une fois le bâtiment modélisé, des scénarios de présence et de comportements des occupants peuvent être ajoutés au modèle.

2.1.2 Reproduction du comportement des occupants

Le comportement des occupants est influencé par un grand nombre de causes, à la fois externes à l'occupant lui-même (par exemple, la température de l'air, la vitesse du vent, etc.), et internes ou individuelles (par exemple, antécédents personnels, attitudes, préférences, etc.) et des caractéristiques du bâti et des systèmes (par exemple, le statut de l'occupant : propriétaire ou locataire, son âge, le type d'appareil de chauffage installé, etc.). Ainsi, dans le contexte du comportement des occupants, l'interaction des occupants avec le bâti et les systèmes est clairement influencée par des conditions physiques, mais « *leur utilisation tend à être régie par une relation stochastique plutôt que déterministe* » d'après [Nicol \(2001\)](#). Le comportement des occupants est donc adaptatif et stochastique.

D'autres actions à l'intérieur des logements (par exemple, cuisiner, regarder la télévision, etc.) influencent la température au sein du bâtiment sans pour autant correspondre à une interaction avec le bâti.

En simulation du bâtiment, trois approches sont utilisées pour modéliser le comportement des occupants. L'approche orientée agent, l'approche stochastique et l'approche déterministe. Les deux premières approches ont pour principal objectif une meilleure prise en compte de la diversité du comportement des occupants dans un bâtiment afin d'améliorer la prévision des performances par les logiciels de STD. Les deux premières approches génèrent des scénarios de comportements des occupants de façon autonome.

L'approche orientée agent permet de modéliser des occupants ou agents pouvant interagir entre eux et dont les actions peuvent servir à répondre à un objectif fixé comme le confort. Les modèles orientés agent reposent sur un processus qui détermine de manière autonome à chaque pas de temps la réalisation d'une action ainsi que son intensité. Ce processus peut faire appel à une logique d'observation, d'apprentissage et de décision. Les agents alors modélisés peuvent décider de la réalisation ou de la variation de l'intensité de l'action en fonction de leur état de confort actuel et de l'efficacité de l'action pour atteindre l'objectif. En fonction des modèles, les agents gardent ainsi en mémoire l'efficacité passée d'une action pour atteindre l'objectif et ceci afin d'orienter la phase de décision. Dans le modèle proposé par [Lee et Malkawi \(2014\)](#), les comportements des occupants qui peuvent varier sont leurs activités, leurs vêtements, l'ouverture des fenêtres, des volets et des portes du bâtiment ainsi que le contrôle de la ventilation. La fonction objectif rattachée à chacun des occupants est le confort thermique. Le modèle proposé par [Langevin et al. \(2015\)](#) comporte une phase d'apprentissage basée sur une année de mesures afin de prédire le comportement des occupants et est donc uniquement adapté au bâtiment et aux occupants concernés.

L'approche stochastique est basée sur un processus statistique. La réalisation d'une action découle alors d'une loi de probabilité qui la relie à des variables explicatives. Les lois de probabilités sont issues d'enquêtes et de campagnes de mesure en bâtiment occupé ([Vorger \(2014\)](#), [Wilke et al. \(2013\)](#), [Page et al. \(2008\)](#)). Les variables explicatives peuvent ainsi être des variables d'environnement (par exemple, la température d'air, la vitesse de vent), des variables contextuelles (par exemple, l'heure de la journée, le mois de l'année) et des variables liées aux caractéristiques sociodémographiques des occupants (par exemple, l'âge, le type de profession). En fonction des données d'entrée du modèle comme la météo ou les caractéristiques sociodémographiques des occupants, le modèle génère de façon autonome la présence et les actions relatives aux occupants dans le bâtiment.

Ces deux approches cherchent ainsi à représenter le comportement des occupants de manière réaliste tout en permettant de générer de multiples scénarios de comportement des occupants pour tenir compte de la diversité entre les individus. Aucun de ces deux

modèles ne sera utilisé par la suite dans ces travaux à cause de leur caractère autonome qui est un frein à l'établissement de la méthodologie. Pour aboutir, celle-ci nécessite un modèle où le comportement des habitants est capable de suivre un plan d'expériences (voir 2.2.2) prédéfini entre les différentes simulations. Les scénarios d'actions générés suivent des valeurs imposées. Le choix de la modélisation s'est alors tourné vers une approche déterministe.

L'approche déterministe consiste à modéliser le comportement des occupants à partir de scénarios de comportement prédéfinis dans le temps ou bien à partir de contrôleurs permettant de fixer des seuils d'enclenchement d'une action en fonction de variables internes à la simulation (exemple : seuil de rayonnement solaire sur un vitrage pour gérer la fermeture des protections solaires).

Une fois le bâtiment et les habitants modélisés, l'approche classique pour étudier l'influence du comportement des occupants sur les performances d'un bâtiment consiste à simuler différents états d'une même action et d'observer l'impact de ce(s) changement(s) sur la sortie du modèle comme la température à l'intérieur d'une zone ou la consommation d'énergie d'un système sur la période de simulation.

2.1.3 Limites de l'approche classique

Avec les outils de STD, des tests paramétriques peuvent être aisément effectués pour évaluer l'impact des actions des occupants sur la performance du bâtiment modélisé. Par exemple, en modifiant la valeur de la température de consigne d'une simulation à l'autre pour un même bâtiment, il est possible d'évaluer l'impact relatif et absolu de l'augmentation et de la diminution de la température de consigne de 1°C sur la consommation d'énergie annuelle d'un bâtiment (Figure 2.3).

L'impact de l'augmentation de 1°C de la consigne de chauffage est alors évalué en considérant toutes les autres entrées du modèle inchangées. Cependant, la quantité d'énergie à fournir par le système de chauffage pour atteindre la température de consigne dépend également, par exemple, de la quantité de rayonnement solaire entrante dans le bâtiment et donc de la gestion par les occupants des protections solaires mobiles pouvant amener des apports de chaleur gratuits. L'impact relatif à l'action des occupants sur la température de consigne de chauffage est donc uniquement valable dans les conditions fixées du test.

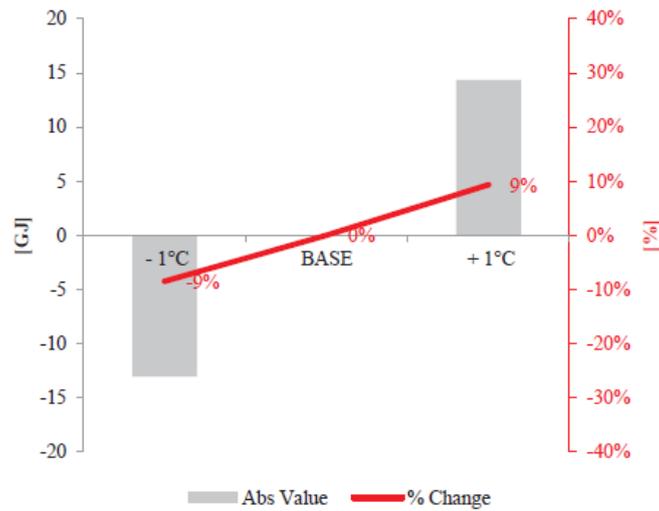


Figure 2.3 – Exemple de résultats obtenus pour le test paramétrique visant à évaluer l'impact de l'augmentation et de la diminution de la température de consigne de chauffage de 1°C sur la consommation d'énergie d'un bâtiment proposé par [Gaetani et al. \(2016\)](#)

Le problème de quantification de l'impact d'une action sur les performances du bâtiment se complexifie alors lorsque l'on cherche à apporter une réponse tenant compte de la variabilité possible des autres sollicitations du modèle. Les configurations à tester se multiplient, l'emploi d'outils statistiques est alors nécessaire pour extraire l'information recherchée. Il s'agit de méthodes d'analyse de sensibilité.

2.2 Outils statistiques pour la quantification des impacts des habitants

2.2.1 Méthodes d'analyse de sensibilité

Une définition possible de l'analyse de sensibilité d'après [Saltelli et al. \(2004\)](#) est « l'étude de la façon dont l'incertitude de la sortie d'un modèle (numérique ou autre) peut être attribuée à l'incertitude des différentes entrées du modèle ». Ce type d'analyse fournit en sortie un indice de sensibilité caractérisant, qualitativement ou quantitativement suivant la méthode retenue, l'influence de la variation d'un paramètre d'entrée du modèle sur la sortie d'intérêt. Parmi ces méthodes, on distingue les méthodes dites locales des méthodes dites globales.

Méthodes locales

Avec une méthode locale, le calcul des sensibilités d'un modèle est basé sur l'évaluation des répercussions sur les valeurs de sortie du modèle de petites perturbations des valeurs des entrées, et ce autour d'un point nominal. Elle fait partie des méthodes suivant un plan d'expériences OAT (One At a Time), signifiant un processus d'exploration de l'espace des entrées faisant varier la valeur d'une seule entrée à la fois. Cette approche consiste à calculer des indices basés sur les dérivées partielles du modèle en un point précis. La dérivée partielle de la sortie Y par rapport à chaque entrée X_j au voisinage de sa valeur nominale x_0 est alors déterminée :

$$\left. \frac{\partial Y}{\partial X_j} \right|_{x=x_0} \quad (2.1)$$

Cependant, avec les plans OAT, une part importante de l'espace d'entrée n'est pas explorée. Même si l'analyse est faite sur des plages de variation conséquentes, la non simultanéité des variations sur les entrées entraîne la non prise en compte des interactions, ce qui peut représenter plus de 99% d'espace des paramètres inexploré ([Saltelli et Annoni \(2010\)](#)).

Pour pallier aux limites des méthodes locales (variations locales, pas de prise en compte des phénomènes d'interactions et forte dépendance du modèle à la valeur nominale choisie), une nouvelle génération de méthodes s'est développée dans un cadre statistique ([Iooss \(2011\)](#)). Par opposition aux méthodes locales, elles ont été dénommées « globales » car elles s'intéressent à l'ensemble du domaine de variation possible des variables d'entrée ([Saltelli \(2008\)](#)).

Méthodes de criblage

Un premier niveau d'information fourni par les analyses de sensibilité globale est le classement des différentes entrées selon leur type et rang d'influence sur la sortie du modèle étudiée. Il s'agit des méthodes de criblage. Ces méthodes fournissent une mesure qualitative de l'influence d'une entrée sur la sortie. Ces méthodes sont basées sur la discrétisation des entrées en plusieurs valeurs nommées niveaux.

La méthode de Morris est la méthode de criblage la plus répandue dans le domaine de la performance énergétique du bâtiment. Elle consiste à réaliser successivement plusieurs plans OAT appelés trajectoires. Chaque trajectoire est composée d'expériences pour lesquelles le modèle sera évalué. La combinaison des entrées de la première expérience est tirée aléatoirement. Ensuite, d'une expérience à l'autre, seule une entrée est augmentée ou diminuée à hauteur d'un niveau. Les expériences suivent donc une trajectoire. Pour la dernière expérience, l'ensemble des entrées ont été modifiées séquentiellement formant ainsi une « trajectoire » depuis la combinaison de départ. D'une trajectoire à l'autre, le point de départ de la trajectoire est tiré aléatoirement. Sur l'ensemble de la méthode, chaque entrée a donc été modifiée autant de fois que de trajectoires. Pour chaque trajectoire, la variation de la sortie relative à la variation de chaque entrée est évaluée. La moyenne (en valeur absolue) μ et l'écart type σ de ces effets élémentaires entre les trajectoires sont calculés pour chaque entrée variable du modèle (Morris (1991)). Grâce à une analyse graphique de ces indices, la méthode de Morris permet de classer les entrées selon trois catégories :

- les entrées ayant des effets négligeables,
- les entrées ayant des effets linéaires et sans interaction,
- et les entrées ayant des effets non linéaires et/ou avec interactions (sans distinction entre ces deux types d'effets).

Ainsi, la méthode de Morris ne donne pas d'information précise quant à l'influence ni au sens de l'impact des entrées testées sur la sortie du modèle mais elle constitue une première étape dans l'analyse de sensibilité d'un modèle en permettant d'orienter les recherches sur les entrées influentes.

En complément des méthodes qualitatives, des méthodes d'analyse de sensibilité globale sont capables de quantifier précisément l'influence d'une entrée sur la sortie d'un modèle.

Dans le domaine de la performance énergétique du bâtiment deux familles de méthodes sont communément utilisées : les méthodes basées sur la régression linéaire et les méthodes basées sur la décomposition de la variance.

Méthodes basées sur la régression linéaire

Les principales méthodes faisant partie de la famille des méthodes basées sur la régression linéaire sont (Saporta (2006)) :

- le coefficient de corrélation linéaire ou coefficient de Pearson noté $\rho(X_j, Y)$ ou $PEAR(X_j, Y)$ avec :

$$\rho(X_j, Y) = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j)(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} = \frac{\text{Cov}(X_j, Y)}{\sigma_{X_j} \sigma_Y} \quad (2.2)$$

en prenant $f(\cdot)$ le code de calcul, $X = (X_0, \dots, X_j, \dots, X_d)$ les d entrées variables du modèle, N le nombre d'évaluation du modèle et Y_i la sortie scalaire correspondant à la i -ème évaluation du modèle, tel que $Y = f(X)$. La valeur de ce coefficient est comprise entre -1 et 1, et représente la corrélation linéaire entre une entrée du modèle et la sortie.

- le coefficient de régression standard noté $SRC(X_j, Y)$ avec

$$SRC(X_j, Y) = \beta_j \sqrt{\frac{V(X_j)}{V(Y)}} \quad (2.3)$$

où β est le coefficient de régression de l'entrée X_j lorsque le modèle est approximé par un modèle de régression en estimant que les effets des interactions sont négligeables tel que :

$$Y = \sum_{j=0}^d \beta_j X_j + \varepsilon \quad (2.4)$$

avec ε l'erreur du modèle de régression. Les entrées X variables du modèle n'étant pas forcément exprimées dans la même unité, les coefficients β sont standardisés en appliquant un facteur de conversion, un rapport entre une mesure unitaire de la variation de l'entrée X_j et une mesure unitaire de la variation de la sortie Y . Le coefficient SRC est donc une mesure de la relation linéaire entre une entrée et la sortie.

- le coefficient de corrélation partielle noté $PCC(X_j, Y)$ avec :

$$PCC(X_j, Y) = \rho(X_j - \hat{X}_j, Y - \hat{Y}) \quad (2.5)$$

avec Y obtenu à partir d'un modèle de régression identique à 2.4, \hat{Y} la prévision du modèle linéaire dans lequel X_j n'est pas présent et \hat{X}_j la prévision du modèle linéaire qui exprimerait X_j en fonction des autres entrées (2.6). Le coefficient PCC permet d'éliminer l'influence des autres variables et est donc adapté aux cas où les

variables d'entrée sont corrélées (Saltelli et al. [51]).

$$\widehat{X}_j = c_0 + \sum_{\substack{p=0 \\ p \neq j}}^d c_p X_p \quad \text{et} \quad \widehat{Y} = b_0 + \sum_{\substack{p=0 \\ p \neq j}}^d b_p X_p \quad (2.6)$$

En pratique, l'indice *PEAR* n'est utilisable que si la relation entre la sortie Y du modèle et l'entrée X_j est approximativement linéaire. De même, les indices *SRC* et *PCC* présentés ne sont utilisables que si le modèle de régression multivarié construit est linéaire. Il faut alors effectuer un test de linéarité avec les outils statistiques classiques comme par exemple le coefficient de détermination R^2 (Saporta (2006)). Si l'hypothèse de linéarité est jugée acceptable, généralement fixée tel que $R^2 > 0,7$ alors les indices de sensibilité *PEAR*, *SRC* et *PCC* sont utilisables. De plus, la qualité du modèle de régression est dépendante du nombre d'évaluations du modèle.

Dans le cas où la relation entre les entrées X et la sortie Y du modèle n'est pas linéaire mais seulement monotone, les coefficients de Spearman, de corrélation et de régression basés sur les rangs (Spearman, *SRRC* et *PRCC*) peuvent être utilisés (Saltelli (2008)).

— le coefficient de Spearman est noté $r(X_j, Y)$ ou *SPEA*(X_j, Y). Ce coefficient est une variante du coefficient de Pearson qui examine s'il existe une relation entre le rang d'une variable d'entrée et le rang de la variable de sortie, ce qui permet de détecter l'existence d'une relation monotone (croissante ou décroissante), quelle que soit sa forme précise (linéaire, exponentielle, puissance, ...). Avec un échantillon de taille N , le calcul du coefficient de Spearman nécessite :

1. de classer les $N X_{ij}$ par ordre croissant puis d'attribuer le rang 1 à la plus petite valeur et le rang N à la plus grande. Le rang associé à l'entrée X_{ij} est alors noté X'_{ij} .
2. de classer les $N Y_{ij}$ par ordre croissant puis d'attribuer le rang 1 à la plus petite valeur et le rang N à la plus grande. Le rang associé à la sortie Y_i est alors noté Y'_i .
3. en cas de couple ex-aequo, les rangs moyens sont calculés. Après les deux classements, deux séries appariées de rangs sont obtenues.

Ainsi, le coefficient de Spearman n'est ni plus ni moins que le calcul de régression de Pearson calculé sur les rangs soit :

$$r(X_j, Y) = \frac{\text{Cov}(X'_j, Y')}{\sigma_{X'_j} \sigma_{Y'}} \quad (2.7)$$

— le coefficient de régression standard sur les rangs noté *SRRC* est le pendant du

coefficient *SRC* mais à partir de l'échantillon (X', Y') tel que :

$$SRRC(X_j, Y) = \beta_j \sqrt{\frac{V(X'_j)}{V(Y')}} \quad (2.8)$$

— le coefficient de corrélation partielle sur les rangs noté *PRCC* est le pendant du coefficient *PCC* mais à partir de l'échantillon (X', Y') tel que :

$$PRCC(X_j, Y) = \rho(X'_j - \widehat{X}'_j, Y' - \widehat{Y}') \quad (2.9)$$

L'hypothèse de monotonie doit bien sûr être validée, par exemple à l'aide du coefficient de détermination R'^2 basé sur les rangs. La qualité du modèle de régression est aussi dépendante du nombre d'évaluations du modèle.

Méthodes basées sur la décomposition de la variance

Dans le cas d'un modèle non linéaire non monotone ou sans connaissance a priori sur le fonctionnement du modèle, les méthodes d'analyse de sensibilité basées sur la décomposition de la variance sont utilisables. On peut alors estimer l'importance des entrées sur la sortie du modèle en utilisant la décomposition de $f(\cdot)$ en somme de fonctions élémentaires (2.10).

$$Y = f(X_1, \dots, X_d) = f_0 + \sum_{j=1}^d f_j(X_j) + \sum_{1 \leq j < k < d} f_{jk}(X_j, X_k) + \dots + f_{1, \dots, d}(X_1, \dots, X_d) \quad (2.10)$$

où

$$\begin{aligned} f_0 &= E(Y), \\ f_j(X_j) &= E(Y|X_j) - E(Y), \\ f_{jk}(X_j, X_k) &= E(Y|X_j, X_k) - E(Y|X_j) - E(Y|X_k) + E(Y) \end{aligned}$$

et ainsi de suite pour les ordres supérieurs. $E(\cdot)$ représente l'espérance mathématique.

Cette décomposition a été introduite par Sobol (Sobol' (1993)) pour l'analyse de sensibilité, d'où son appellation « décomposition de Sobol » dans ce domaine. Il a notamment montré que cette décomposition est unique. Si les variables d'entrée X sont indépendantes, la décomposition de la variance, appelée aussi ANOVA-décomposition (ANalysis Of VAriance), peut être obtenue :

$$V = \sum_j V_j + \sum_{j < k} V_{jk} + \sum_{j < k < m} V_{jkm} + \dots + V_{12..d} \quad (2.11)$$

où

$$\begin{aligned} V_j &= V(E(Y|X_j)), \\ V_{jk} &= V(E(Y|X_j, X_k)) - V_j - V_k \end{aligned}$$

et ainsi de suite pour les ordres supérieurs. $V(\cdot)$ représente la variance mathématique. Puisque $E(Y|X_j)$ est la meilleure approximation de Y sur l'espace engendré par X_j , la variance de cette quantité $V(E(Y|X_j))$ mesure la dispersion de Y due à la variation de X_j .

À partir de l'équation 2.11, les indices de sensibilité s'obtiennent facilement en divisant les différentes variances par la variance totale de la sortie $V = V(Y)$.

$$S_j = \frac{V_j}{V}, \quad S_{jk} = \frac{V_{jk}}{V}, \quad S_{jkm} = \frac{V_{jkm}}{V}, \quad \dots \quad (2.12)$$

Ces coefficients sont les indices de Sobol. Étant normalisés, les indices sont compris entre 0 et 1. L'indice S_j est l'indice de sensibilité du premier ordre de l'entrée variable X_j . C'est à dire la part de la variabilité de la sortie Y expliquée uniquement par la variabilité de X_j seule. Plus l'indice est grand et plus l'effet de la variable sur la sortie est important. Les autres indices, S_{jk}, \dots, S_{jkm} correspondent aux indices de sensibilité d'ordre supérieur et reflètent la part de la variance de la sortie expliquée par des interactions dans le modèle entre les différentes variables d'entrée. La somme des indices de sensibilité est égale à 1. Ainsi si on vérifie que $\sum_j S_j \simeq 1$ alors les effets d'ordre supérieur à 1 peuvent être négligés puisque peu influents.

Lorsque le nombre de variables d'entrée d augmente, le nombre d'indices de sensibilité croît exponentiellement (il vaut $2^d - 1$) ce qui rend l'estimation et l'interprétation des indices d'ordres supérieurs complexes. Homma et Saltelli (1996) ont alors introduit la notion d'indice de sensibilité total S_{T_j} pour exprimer tous les effets d'une variable d'entrée X_j sur la sortie :

$$S_{T_j} = \sum_{l \in \#j} S_l \quad (2.13)$$

où $\#j$ représente tous les sous-ensembles d'indices contenant l'indice j . La procédure est donc d'obtenir dans un premier temps l'effet seul de chaque variable par le calcul de S_j , puis, en fonction de la somme des indices du premier ordre, la présence ou non d'interactions est facilement déterminée et conditionne le calcul ou non des effets totaux. En pratique, quand d est grand (exemple $d > 10$), on se contente souvent d'estimer et d'interpréter les indices d'ordre un et les indices totaux.

Les indices de sensibilité de Sobol sont intuitifs et particulièrement recommandés

dans le cas de modèles complexes. Pour estimer les indices de Sobol, plusieurs méthodes sont possibles dont la méthode proposée par Sobol lui-même et la méthode FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test). En effet, dans le cas où le modèle $f(\cdot)$ n'est pas connu analytiquement, il faut avoir recours à des méthodes numériques pour estimer ces indices (Chastaing (2013)). La qualité de l'estimation de ces indices est alors dépendante de la méthode d'échantillonnage et de la taille de celui-ci.

L'estimation des indices par la méthode de Sobol se base sur la propagation de plusieurs jeux d'échantillons et souffre donc d'un coût de calcul très élevé, car elle doit faire appel à de nombreuses évaluations du modèle pour estimer l'ensemble des indices de sensibilité. Cette méthode connaît des variantes faisant, entre autres, varier le type d'échantillonnage employé grâce à une astuce de permutation dans le plan d'expériences. Dans Goffart (2013), le fonctionnement de cette méthode est présenté.

La méthode FAST a été définie par Cukier *et al.* (1973). Les auteurs montrent qu'en associant une fréquence entière, distincte à chaque paramètre, il est possible d'identifier la part de la variance sur une sortie due à un paramètre en particulier. L'effet principal d'un paramètre est calculé en considérant sa fréquence associée ainsi que ses harmoniques sur le spectre de la sortie considérée. Le principe de fonctionnement de cette méthode est présenté sur la Figure 2.4 :

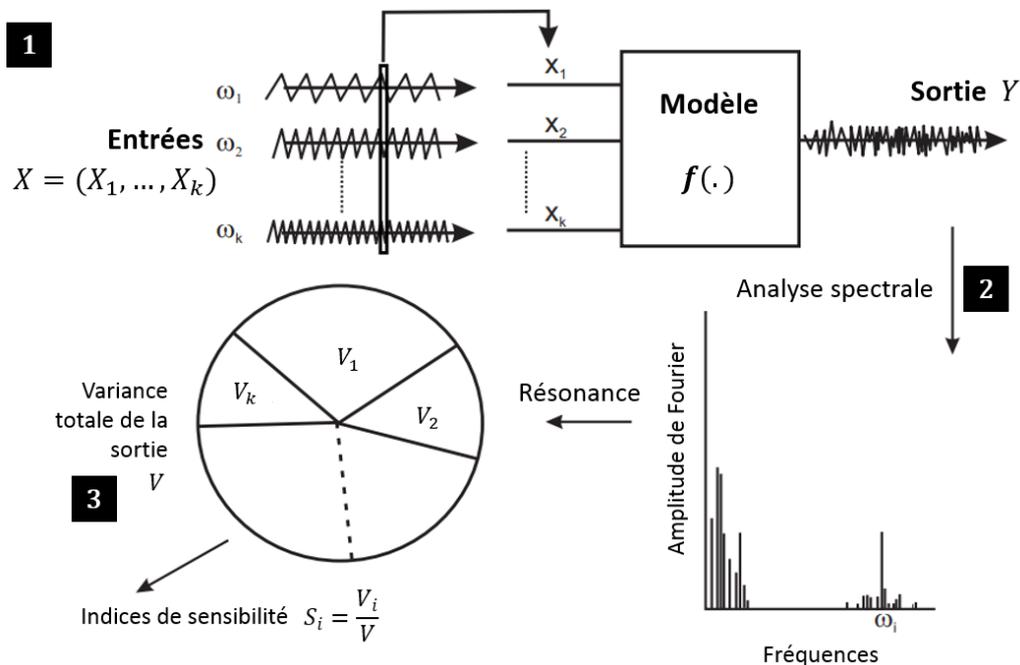


Figure 2.4 – Schéma de fonctionnement de la méthode FAST en 3 étapes, adapté en français d'après Plischke (2017)

1. Pour chaque entrée du modèle variable, une fréquence propre lui est assignée

2. La recherche de fréquences de résonance sur la sortie obtenue est réalisée (après réorganisation du signal d'entrée pour chaque variable)
3. L'attribution des résonances aux différentes fréquences d'entrée donne la contribution sur la variabilité de la sortie

Les limitations de cette méthode concernent le nombre de simulations requises pour parvenir à une estimation précise des indices de sensibilité, le choix des fréquences associée aux entrées (étape 1 sur le schéma présenté de la Figure 2.4), la présence d'un biais et la difficulté pour retrouver des indices d'ordre élevé. Pour cela des variantes de cette méthode ont été développées. La méthode EFAST (Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test) (Saltelli *et al.* (1999)) permet de gérer les problèmes d'échantillonnage liés à l'estimation des coefficients de Fourier. La méthode RBD-FAST (Random Balance Design - Fourier Amplitude Sensitivity Test) (Tarantola *et al.* (2006)) a été introduite dans le but de contourner les difficultés liées au choix des fréquences grâce à un jeu de permutation. La performance de la méthode RBD-FAST pour calculer les indices du premier ordre a déjà été démontrée dans Gatelli *et al.* (2009), Mara et Joseph (2008) et Tarantola *et al.* (2006).

Dans le cas où les entrées variables sont corrélées ou fonctionnelles, des méthodes spécifiques d'analyse de sensibilité doivent être choisies (Goffart (2013)).

Pour la plupart des méthodes, le fonctionnement général d'une analyse de sensibilité est composé de 3 étapes :

1. La génération du plan d'expériences
2. La réalisation des simulations
3. Le calcul des indices

Souvent, la méthode d'échantillonnage permettant de générer le plan d'expériences est liée à la méthode de calcul des indices. Les méthodes d'échantillonnage fréquemment rencontrées sont présentées au Chapitre 2.2.2.

2.2.2 Méthodes d'échantillonnage

L'échantillonnage des variables d'entrées conditionne les résultats d'analyse de sensibilité. La taille de l'échantillon et la manière d'échantillonner jouent sur la précision et la rapidité de l'estimation des indices.

Pour la plupart des méthodes d'échantillonnage, lorsque les entrées sont indépendantes, la création des N échantillons repose sur des lois de distribution qui sont affectées à chacune des entrées variables de l'analyse. Pour chaque entrée, un tirage aléatoire est réalisé dans la loi de probabilité définie en amont. Ce processus est répété pour chaque entrée et pour les N échantillons du plan d'expérience qui sera ensuite propagé dans le modèle. Un processus basé sur l'exploration d'un modèle à partir de lois de probabilité sur les entrées est un processus de Monte Carlo. La Figure 2.5 illustre ce processus.

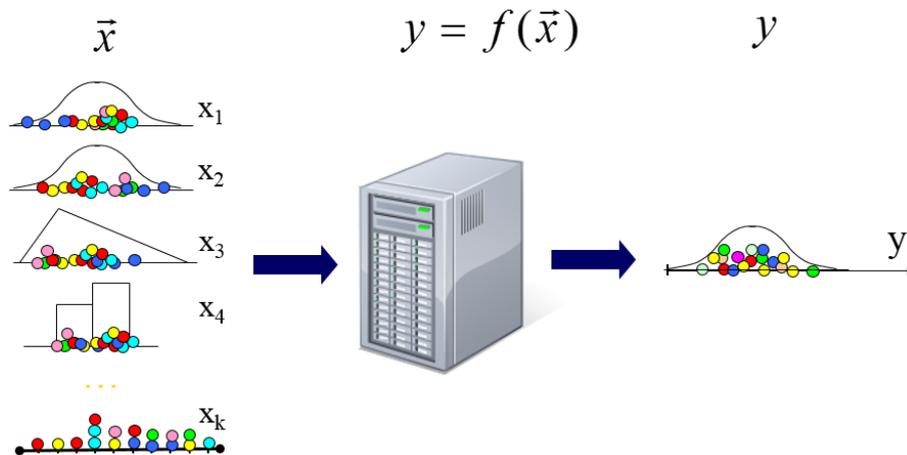


Figure 2.5 – Processus de Monte Carlo pour la propagation d'échantillons dans un modèle numérique. Dans cette figure, les entrées sont associées à une loi normale (x_1, x_2), triangulaire (x_3), ou sont catégorielles (x_4) ou discrètes (x_k), d'après [Tarantola \(2014\)](#)

Deux types de distribution sont majoritairement utilisés pour étudier la sensibilité d'un modèle de bâtiment, la loi uniforme et la loi normale. En règle générale, lorsqu'aucune information a priori n'est disponible, la plage de variation du paramètre est choisie suffisamment grande pour être plausible et une distribution de densité uniforme est supposée ([Mara et Tarantola \(2008\)](#)). La loi de distribution normale est quant à elle utilisée quand la valeur d'un paramètre est a priori connue mais qu'il existe une marge de manœuvre sur son exactitude. La plage de variation du paramètre est alors centrée sur la valeur a priori. Ces deux types de loi ont par exemple été utilisés dans les travaux de [Spitz \(2012\)](#).

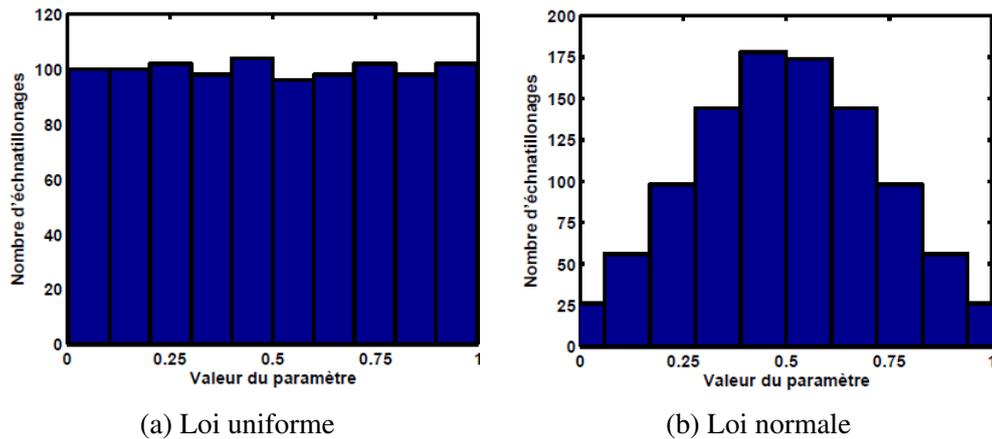


Figure 2.6 – Lois de distribution utilisées dans [Spitz \(2012\)](#)

Les méthodes d'échantillonnage par processus de Monte Carlo les plus communes sont l'approche Monte Carlo classique, l'approche par hypercube latin ou LHS (Latin Hypercube Sampling) et l'approche Quasi-Monte Carlo. Ces trois techniques d'échantillonnage diffèrent par les algorithmes qui encadrent plus ou moins aléatoirement la sélection des valeurs à partir des lois de densité de probabilité.

L'approche Monte Carlo classique est une approche purement aléatoire de sélection des variables d'entrée à partir des fonctions de densité de probabilité de chacune des variables. Ce caractère « aléatoire » est un inconvénient par le fait qu'il n'assure pas une bonne exploration de l'espace d'entrée du modèle en permettant de créer des échantillons proches ou au contraire éloignés dans l'espace d'entrée du modèle. Elle est cependant facile à implémenter et intuitive quant à la création des échantillons. La Figure 2.7 présente la sélection de 5 valeurs pour une variable dont la loi de distribution associée est uniforme dans l'intervalle $[0,10]$. On remarque que la valeur RU(4) est échantillonnée proche de la valeur RU(3) ce qui affaiblit l'exploration de l'entrée du modèle.

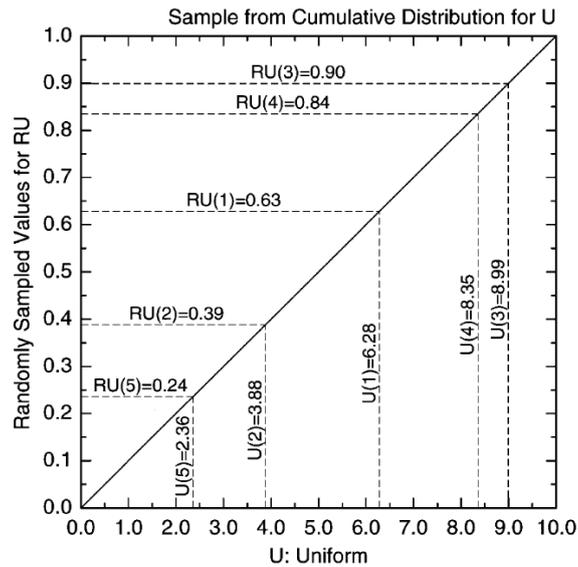


Figure 2.7 – Loi de distribution cumulée associée à une loi uniforme et sélection de 5 valeurs $U(1), \dots, U(5)$ à partir du tirage aléatoire de 5 valeurs $RU(1), \dots, RU(5)$ dans l'intervalle $[0,1]$, d'après Helton et Davis (2003)

Les méthodes visant à contourner le désavantage lié au caractère aléatoire en découpant la fonction de probabilité en sous espaces de probabilité équivalente sont les méthodes dites « stratifiées ».

L'approche LHS est un compromis entre l'approche classique et l'approche par stratification. En découpant la fonction de densité cumulée en N sous-espaces de probabilité égale, cette méthode force une exploration efficace de chacune des entrées. Ce processus est réalisé indépendamment pour chacune des variables. Ensuite les différents échantillons sont créés en combinant aléatoirement les précédentes valeurs sélectionnées. Elle reste intuitive et facile à implémenter et est plus performante en termes de convergence que l'approche classique (Figure 2.7). Il s'agit de la méthode d'échantillonnage la plus utilisée dans le domaine de l'énergétique du bâtiment (Tian *et al.* (2018)). La Figure 2.8 présente la sélection de 5 valeurs avec LHS pour une variable dont la loi de distribution associée est uniforme dans l'intervalle $[0,10]$.

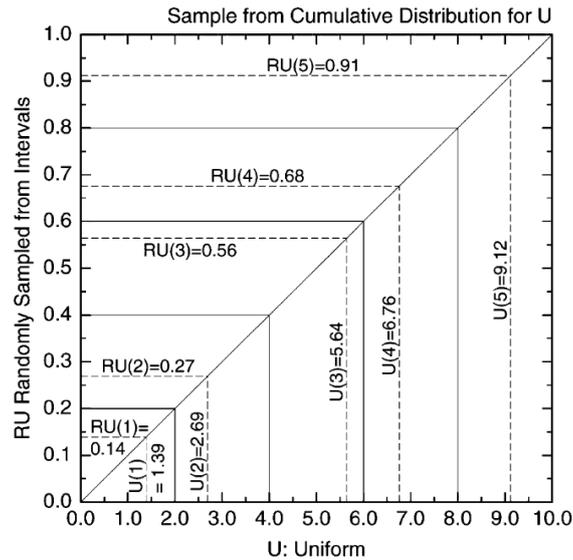


Figure 2.8 – Loi de distribution cumulée associée à une loi uniforme et sélection de 5 valeurs par LHS $U(1), \dots, U(5)$ à partir du tirage aléatoire de 5 valeurs $RU(1), \dots, RU(5)$ dans l'intervalle $[0,1]$. La délimitation des 5 sous-espaces d'équiprobabilité apparaît en traits pleins, d'après Helton et Davis (2003)

L'approche Quasi-Monte Carlo est une version déterministe de l'approche de Monte Carlo classique Jacques (2005). Elle définit des séquences d'échantillons déterministes qui ont une discrédance plus faible que les séquences aléatoires, c'est-à-dire qu'elles ont une meilleure répartition uniforme dans l'espace des variables d'entrée. Cette approche est donc optimisée pour s'assurer que l'espace des entrées est bien uniformément couvert et vise à contrôler les distances entre les différents échantillons. Elle est également performante en termes de convergence mais elle est cependant peu intuitive. Une étude comparative des approches Monte Carlo classique, LHS et Quasi-Monte Carlo a été réalisée dans Kucherenko *et al.* (2006). D'après cette étude, l'approche Quasi-Monte Carlo est la plus efficace lorsque les variables d'entrées ont des distributions non-uniformes.

Les Figures 2.9a, 2.9b, 2.9c donnent un aperçu de l'échantillonnage de taille 1000 pouvant être réalisé sur une variable à partir des méthodes d'échantillonnage présentées basées sur un processus de Monte Carlo.

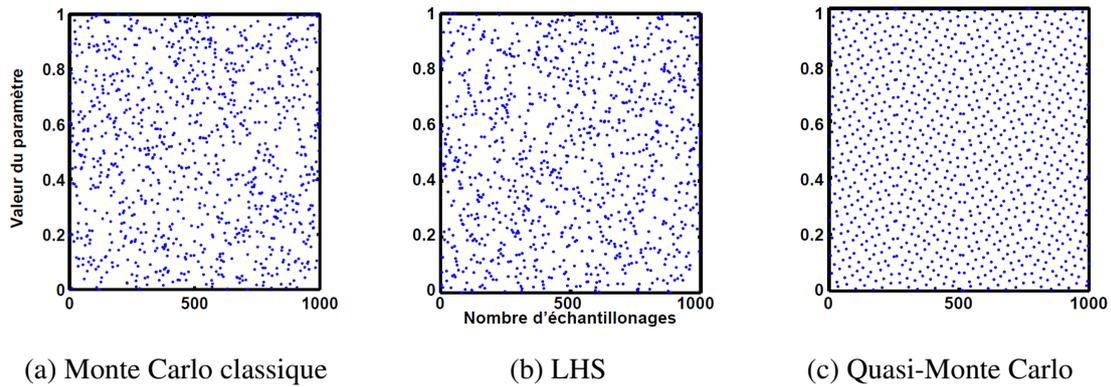


Figure 2.9 – Échantillons obtenus à partir des trois différentes méthodes de Monte Carlo pour une même variable pour un échantillonnage de taille 1000, d’après [Spitz \(2012\)](#)

La méthode d’échantillonnage associée à la méthode de Morris a été présentée en même temps que la description du fonctionnement de cette méthode d’analyse de sensibilité. Pour rappel, l’échantillonnage consiste à découper en grilles régulières l’espace d’entrée à partir desquelles des trajectoires sont déterminées. Les trajectoires sont composées d’expériences pour lesquelles le modèle sera évalué. Sur la Figure 2.10, trois trajectoires pouvant être construites par cette méthode sont présentées.

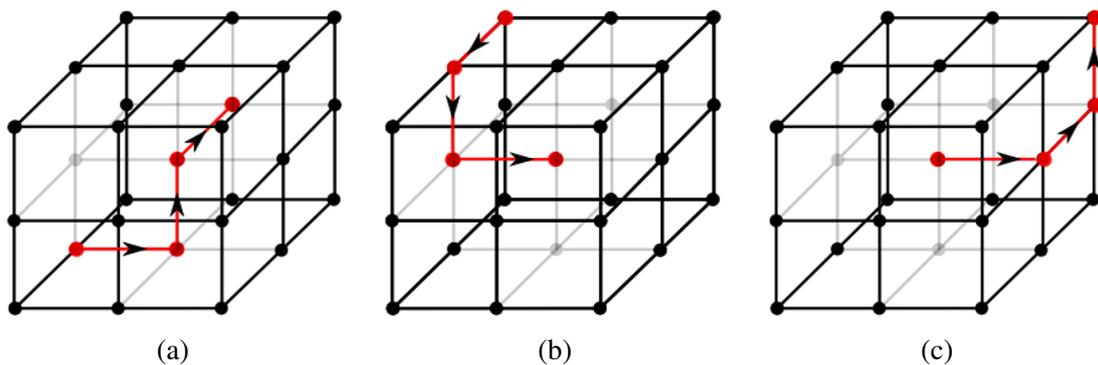


Figure 2.10 – Détermination de trois trajectoires 2.10a, 2.10b, 2.10c (en rouge) par la méthode de Morris pour un plan d’expériences à trois variables, variant sur trois niveaux, d’après [Munaretto \(2014\)](#)

De nombreuses études utilisent l’analyse de sensibilité sur des modèles de bâtiment. Les éléments théoriques présentés dans ce chapitre servent de base à une meilleur compréhension de travaux déjà réalisés dans ce domaine.

2.2.3 Analyses de sensibilité appliquées au bâtiment

L'analyse de sensibilité a déjà été largement appliquée dans le domaine du bâtiment et [Tian \(2013\)](#) résume différentes méthodes et applications possibles dans ce domaine. Les entrées de l'analyse de sensibilité déjà étudiées sont de nature catégorielle, statique ou dynamique suivant si l'influence des propriétés intrinsèques du bâtiment, du type de système installé, de la météo ou du comportement des occupants sur la réponse thermique du bâtiment est évaluée. De plus, suivant les phénomènes, les interactions et les sollicitations modélisés, les modèles peuvent être plus ou moins complexes (non monotones, non linéaires).

Dans cette partie, des études cherchant à évaluer l'influence du comportement des occupants sur la performance du bâtiment sont présentées. La performance de sortie du bâtiment se résume souvent à un indicateur agrégé comme par exemple la consommation d'énergie annuelle ou bien le nombre d'heures d'inconfort annuel. Dans ces études, les trois types de méthode d'analyse de sensibilité, locale, de criblage ou globale sont rencontrés permettant donc d'obtenir une information plus ou moins riche (locale, qualitative ou quantitative) en fonction du nombre d'évaluations du modèle.

D'autres auteurs souhaitent, au prix d'un coût de calcul élevé, quantifier la dynamique de l'influence du comportement des habitants sur des sorties comme la température à l'intérieur du bâtiment à différents pas de temps. Dans ces études, les méthodes d'analyse de sensibilité globale sont préférées car l'évolution au cours du temps des indices de sensibilité permet de représenter facilement l'évolution de l'influence des occupants sur la sortie temporelle observée.

Analyse de sensibilité sur une sortie agrégée

Pour évaluer rapidement l'influence de l'utilisation d'équipements électriques, de la densité d'occupation et de la puissance d'éclairage parmi d'autres paramètres sur la consommation d'énergie annuelle d'un bâtiment, une analyse de sensibilité locale a été utilisée dans [Rasouli *et al.* \(2013\)](#). À partir d'une simulation de référence, avec des valeurs de paramètres variant de $\pm 25\%$ et en perturbant la valeur d'un seul paramètre d'une simulation à l'autre, l'auteur retrouve l'effet relatif, présenté sur la [Figure 2.11](#), de chacun des paramètres sur la consommation. Cependant les résultats de ce type d'étude ne sont pas généralisables car ils sont dépendants des plages de variation testées et du cas de référence retenu comme le précisent les auteurs.

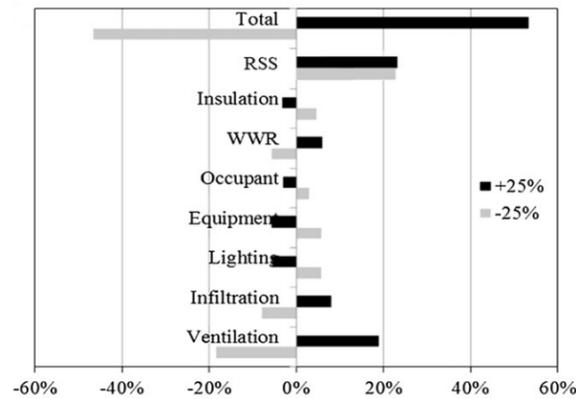


Figure 2.11 – Application d’une méthode d’analyse de sensibilité locale (RSS = Root Sum-Square) à un bâtiment pour étudier l’influence de la variation de paramètres (WWR = Window to Wall area Ratio) sur la consommation d’énergie annuelle, d’après [Rasouli et al. \(2013\)](#)

Pour identifier l’ordre d’influence de différentes variables sur la consommation d’énergie pour le chauffage d’un bâtiment résidentiel, [Corrado et Mechri \(2009\)](#) ont utilisé la méthode de Morris. Parmi les 105 paramètres testés se trouvent des paramètres liés à l’occupation, au métabolisme des occupants ou encore au taux de renouvellement d’air d’une pièce. Les paramètres les plus influents sont visibles sur la Figure 2.12, il s’agit des paramètres pour lesquels le couple (μ, σ) calculé est le plus éloigné du point de coordonnées (0,0). Les auteurs ont alors utilisé une échelle logarithmique afin de mieux distinguer les différents rangs. L’information qualitative fournie peut permettre, comme c’est le cas dans cette étude, de descendre à une dizaine de paramètres sur la centaine testée pour étudier ensuite plus finement l’influence des variables retenues sur la performance du bâtiment.

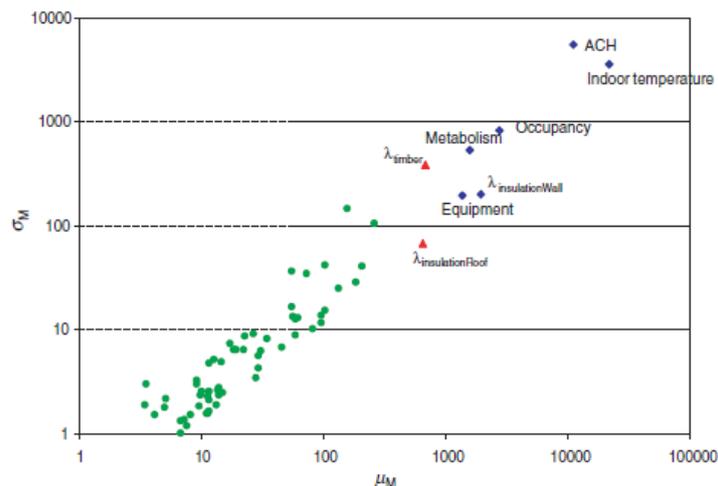


Figure 2.12 – Application de la méthode de Morris à un bâtiment pour étudier l'influence de 105 paramètres sur la consommation de chauffage. Les trois paramètres les plus influents sont, par ordre décroissant : la température de consigne de chauffage, le taux de renouvellement d'air et le nombre d'occupants, d'après [Corrado et Mechri \(2009\)](#)

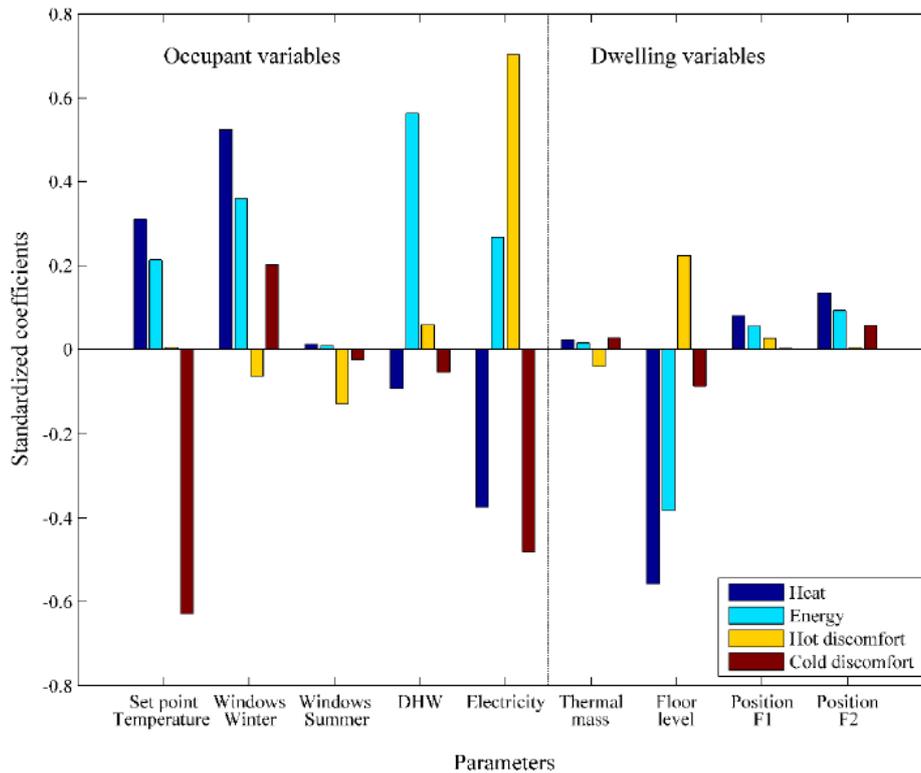
Dans [Rouleau \(2019\)](#), une méthode d'analyse de sensibilité globale est employée. L'auteur a étudié la sensibilité de quatre sorties du modèle à l'aide des indices SRC : le nombre d'heures d'inconfort froid, le nombre d'heures d'inconfort chaud, la consommation d'énergie pour le chauffage et la consommation d'énergie globale. Les variables d'entrée de l'analyse de sensibilité relatives aux actions des occupants sont la consigne de température de chauffage, le taux d'ouverture des fenêtres en hiver, le taux d'ouverture des fenêtres en été, la consommation d'ECS et l'utilisation d'appareils électriques. Les autres variables sont relatives à la typologie des appartements. L'auteur a construit un modèle de régression linéaire pour chaque sortie étudiée et chaque modèle de régression a nécessité le résultat de 4000 simulations du modèle STD. Les indices de sensibilité de ces quatre modèles linéaires se retrouvent sur la Figure 2.13a.

Grâce à cette démarche, il est possible de mettre en évidence la dynamique associée à l'influence de l'utilisation d'appareils électriques sur le confort thermique. L'utilisation de ces appareils tend d'un côté à faire diminuer l'inconfort en hiver alors que ce même comportement tend à le faire augmenter en période estivale dans un immeuble de plusieurs appartements.

Cependant, pour s'assurer de la fiabilité des coefficients obtenus, l'auteur a testé l'hypothèse de linéarité pour les 4 modèles de régression, ce qui est nécessaire pour pouvoir utiliser les indices SRC. Les résultats de ces calculs sont présentés sur la Figure 2.13b. Pour mesurer cette linéarité, le coefficient de détermination R^2 est utilisé. D'après ces résultats, l'auteur conclut que l'hypothèse de linéarité est vérifiée pour les modèles de

2.2. Outils statistiques pour la quantification des impacts des habitants

régression des deux premières sorties car les valeurs des R^2 sont élevées ($>80\%$), à la différence des modèles relatifs au confort pour lesquels l'hypothèse de linéarité peut être remise en cause.



(a) Indices de sensibilité SRC associés aux 9 paramètres testés sur les 4 sorties

Performance indicators	HD	TEU	NHCD	NHHD
R^2	0.864	0.936	0.698	0.588
F-test	900	2062	327	202
$\sum \beta_j^*$	0.852	0.719	0.681	0.570

(b) Vérification de la linéarité des 4 modèles de régression à l'aide d'indicateurs statistiques.
 HD : Demande de chauffage, TEU : Énergie totale consommée, NHCD : Nombre d'heures d'inconfort froid, NHHD : Nombre d'heures d'inconfort chaud

Figure 2.13 – Résultats de l'étude menée par Rouleau (2019) afin d'évaluer l'impact du comportement des occupants sur la performance globale de logements

Analyse de sensibilité sur une sortie temporelle

Pour évaluer l'influence du comportement des habitants sur une sortie dynamique d'un modèle, comme la température intérieure, une approche temporelle de l'analyse de sensibilité est nécessaire. Cette approche consiste à calculer les indices à différents instants pour lesquels le modèle est évalué.

Les méthodes d'analyse de sensibilité globale non dépendantes du modèle, fournissant une information quantitative sur l'influence d'un paramètre, sont les méthodes les plus coûteuses en temps de calcul. Pour réduire ce temps de calcul, [Spitz \(2012\)](#) a d'abord appliqué une méthode d'analyse de sensibilité locale en perturbant les paramètres à $+/- 1\%$ pour retrouver les paramètres influents sur le modèle. De plus, le signe de l'indice de sensibilité ainsi retrouvé renseigne sur l'effet du paramètre sur la sortie. [Spitz \(2012\)](#) a alors utilisé la méthode de Sobol pour calculer les indices de sensibilité avec un échantillonnage de taille 6669. L'évolution temporelle des indices (cumulés) du premier ordre associés à 10 paramètres a été tracée sur la Figure 2.14. La sortie observée est la température intérieure à chaque pas de temps de la simulation. Parmi les 10 paramètres testés se trouvent les gains de chaleur interne émis au rez-de-chaussée du bâtiment étudié.

Une somme des indices du premier ordre proche de un sur la première période de l'étude indique que la température intérieure calculée par le modèle n'est pas dépendante d'interactions entre les paramètres testés. Cependant, en deuxième période, la somme des indices proche de zéro signifie que la variabilité entre les 6669 valeurs de température retrouvée sur ces instants est très faible. Il n'y a pas lieu de chercher à expliquer la variabilité de la température sur ces instants.

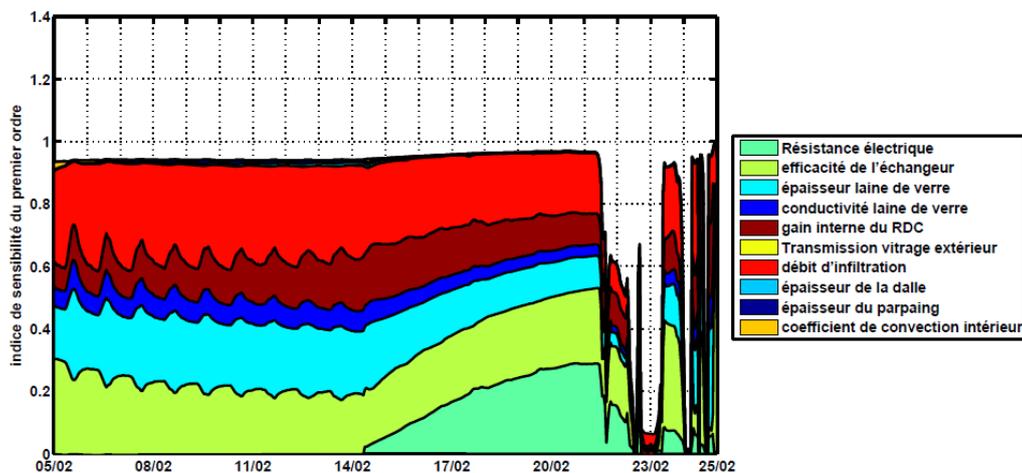


Figure 2.14 – Application de la méthode de Sobol pour étudier l'évolution de l'influence de 10 paramètres sur la température intérieure grâce aux indices de sensibilité du premier ordre, d'après [Spitz \(2012\)](#)

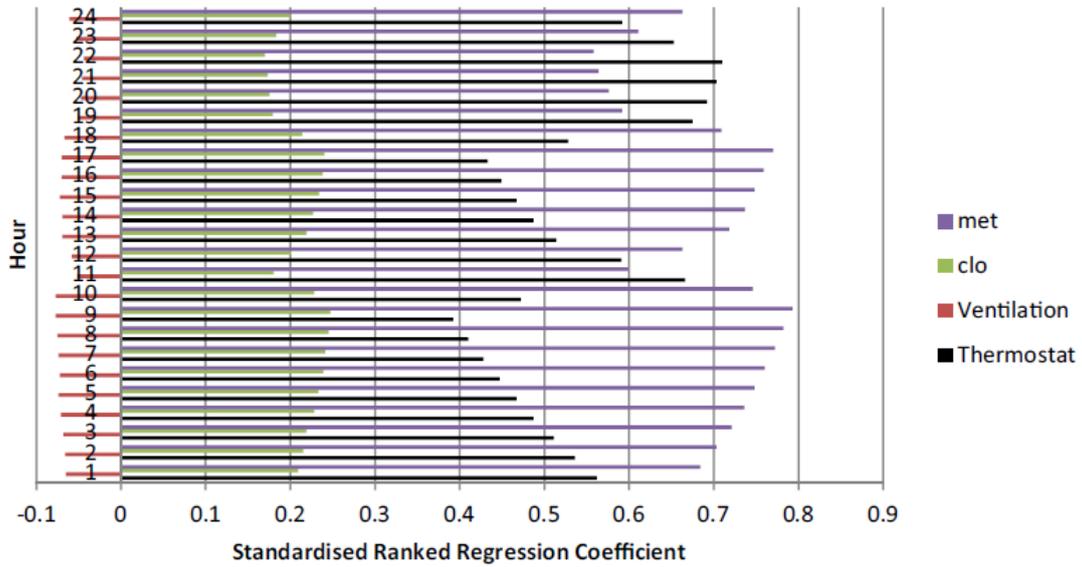
Les indices de confort comme les indices PMV peuvent être calculés par les modèles. Des études ont alors cherché à étudier la sensibilité de ces indices, qui sont, comme la température, variables au cours du temps.

Ioannou et Itard (2015) ont quantifié, sur une période de 24 heures, l'influence du métabolisme des occupants, de leur tenue vestimentaire, de la température de consigne de chauffage et du taux de renouvellement d'air sur le confort ressenti par les occupants avec l'indicateur PMV. À l'aide d'un échantillonnage de Monte Carlo classique de taille 200 et du calcul des indices SRRC¹, les auteurs ont pu mettre en avant que d'une heure à l'autre, le confort ressenti par les occupants n'est pas influencé de la même manière par les paramètres testés en visualisant les résultats des $24 \times 4 = 96$ indices de sensibilité.

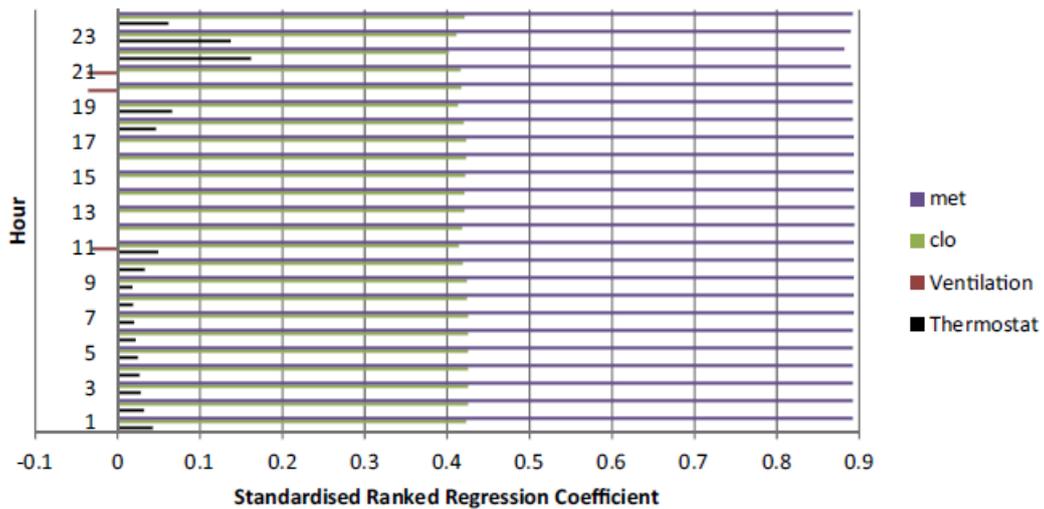
À l'aide des indicateurs de sensibilité, les auteurs remarquent que l'influence de la température de consigne du chauffage sur le confort suit les heures de programmation du chauffage (Figure 2.15a) : après 22h, le chauffage s'arrête entraînant la diminution progressive de l'influence du thermostat jusqu'à 9h du matin et recommence à augmenter à 10h, lorsque le chauffage est déjà allumé depuis une demi-heure et ce, jusqu'à 11h, lorsque le chauffage s'arrête à nouveau. Cette étude poussée permet donc d'étudier finement le lien entre le confort des occupants et la réponse thermique d'un bâtiment.

Dans un premier temps, le bâtiment avait été modélisé avec une enveloppe et un système de chauffage performants, dans un deuxième temps, les auteurs ont modifié les propriétés de l'enveloppe et des systèmes pour les rendre moins performants (Figure 2.15b) dans le but de comparer l'évolution de l'influence des 4 paramètres précédents sur le confort ressenti par les occupants en fonction du type de bâtiment. Les résultats de cette comparaison montrent une nette différence entre les évolutions temporelles des indices de sensibilité de chacun des paramètres entre les deux bâtiments, notamment une faible influence de la température de consigne tout au long de la journée dans le bâtiment le moins performant.

1. l'étude de la monotonie pour valider l'utilisation des indices n'est pas présentée



(a) Bâtiment performant



(b) Bâtiment énergivore

Figure 2.15 – Indices de sensibilité obtenus par Ioannou et Itard (2015) pour observer l'évolution de l'influence de 4 paramètres liés à l'occupant sur le confort thermique au cours d'une journée hivernale pour deux typologies de bâtiment

Ignjatovic *et al.* (2016) ont eu une approche similaire afin d'étudier l'influence d'un plus grand nombre de paramètres (24) sur le confort thermique pour chaque heure comprise entre 8h et 17h (soit 10 heures sur 24), correspondant à la période d'occupation. La sortie observée est l'indicateur de confort PMV et les indices SRRC² sont calculés à partir d'un échantillonnage LHS et de 500 échantillons. Les variables étudiées sont liées au métabolisme (variable IF24), à l'habillement (variable IF23) et aux températures de consigne fixées par les occupants dans les différentes zones (variable IF11, IF13, ...). Certaines variables sont également relatives à des paramètres de fonctionnement d'une CTA (Centrale de Traitement d'Air) comme la température de soufflage et le débit d'air soufflé (variable IF1 et IF2) ou des caractéristiques techniques propres à la CTA. Dans le cadre de leurs hypothèses et sur une semaine chaude³, la visualisation des $24 \times 10 = 240$ indices de sensibilité obtenus leur révèle qu'au cours d'une même journée, une variable peut durant certaines heures tendre à augmenter la valeur de l'indice de confort PMV et à d'autres moment à la faire diminuer. Ce phénomène est visible sur la Figure 2.16 où le changement de signe des indices de sensibilité SRRC relatifs à la température d'alimentation et au débit d'air soufflé par la CTA implique qu'au cours de la journée, le fait d'augmenter la valeur de température de soufflage ou le débit d'air tend à entraîner de l'inconfort froid (SRRC négatif) pendant une partie de la journée (entre 10h et 11h), et de l'inconfort chaud (SRRC positif) pour la durée restante de la période occupée.

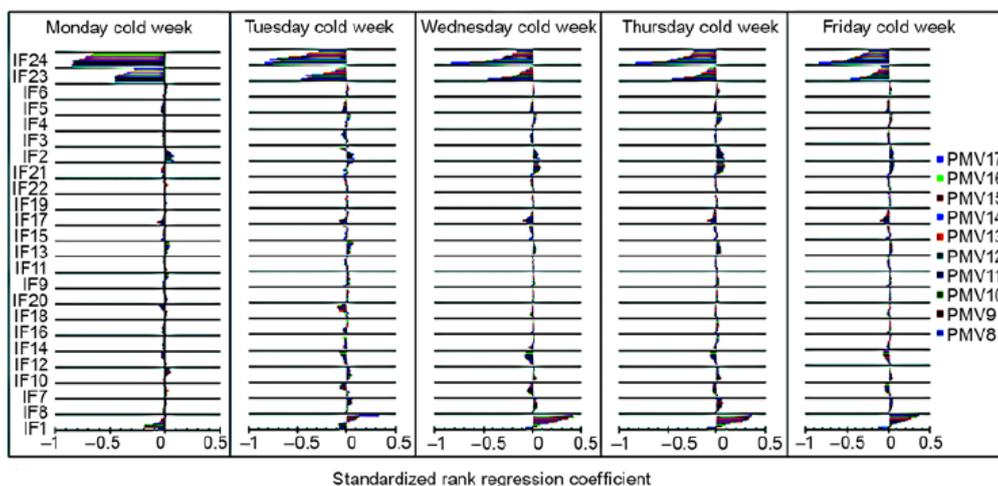


Figure 2.16 – Visualisation sur 5 jours d'une semaine chaude de la variation du sens de l'impact d'une variable sur le confort thermique au cours d'une partie de la journée (Ignjatovic *et al.* (2016))

2. l'étude de la monotonie pour valider l'utilisation des indices n'est pas présentée
 3. sur la Figure 2.16, une erreur s'est glissée dans les titres des figures, il s'agit de la semaine « chaude »

2.3 Objectif scientifique du présent travail

L'approche classique pour quantifier l'influence d'une action des habitants sur les performances d'un bâtiment consiste à simuler différents états de cette action et d'observer l'impact de ces changements sur la sortie du modèle. Cependant, cette approche connaît des limites. En effet, les conclusions tirées de ce type d'étude, communément connue sous le nom d'étude paramétrique, sont fortement dépendantes des conditions dans lesquelles le test est réalisé, notamment des valeurs retenues pour les autres actions qui sont fixées dans le cas de référence. Pour prendre en compte une variabilité réaliste des autres actions, une approche statistique est alors nécessaire.

L'analyse de sensibilité est l'outil statistique communément employé pour répondre à cette problématique dans le domaine de l'étude de la performance de bâtiment (Tian (2013)). La présentation de différentes études appliquant cette méthode a mis en valeur le potentiel des résultats d'une analyse de sensibilité. Encore plus précise, l'analyse de sensibilité temporelle permet de quantifier la sensibilité de la réponse thermique d'un bâtiment à différentes actions au cours du temps. Il est ainsi possible de mettre en évidence la dynamique de l'influence des actions sur la réponse thermique, notamment l'intensité et surtout la persistance de l'impact d'une action sur un modèle (Spitz (2012), Ioannou et Itard (2015), Ignjatovic *et al.* (2016)).

La contrepartie de l'approche temporelle par rapport à une approche classique basée sur un indicateur agrégé est qu'elle nécessite un effort supplémentaire d'exploitation des résultats car les indices sont plus nombreux, ce qui freine la généralisation de cette démarche qui se limite souvent à une étude visuelle des résultats.

Partant de ce constat, ces travaux de thèse visent à développer des indicateurs capables d'extraire les multiples informations fournies par les indices de sensibilité temporelle. De plus, sans connaissance a priori sur notre modèle (linéarité et monotonie), la sélection d'une méthode basée sur la variance est un choix conservateur en ce qui concerne la robustesse des résultats. En effet, parmi les études décrites, les méthodes d'analyse de sensibilité basées sur des régressions linéaires font l'objet de nombreuses applications temporelles car elles sont intuitives, permettent d'obtenir des résultats avec moins de simulations que les méthodes basées sur la décomposition de la variance et surtout, fournissent des indices signés. Grâce à ce signe, il est possible d'étudier le sens de l'impact d'une variable sur la sortie observée. Cependant, un des écueils de ces méthodes est que les résultats de sensibilité peuvent être non valables si le modèle de régression créé se révèle être non-linéaire ou non-monotone (Saporta (2006)). Seules des méthodes de sensibilité indépendantes de la complexité du modèle comme les méthodes basées sur la

décomposition de la variance permettent de s'assurer de la validité des résultats.

La méthode RBD-FAST avec la méthode d'échantillonnage LHS seront utilisés dans ces travaux. Leurs différents avantages ont été respectivement présentés aux Chapitres 2.2.1 et 2.2.2 et sont déjà appliqués dans le domaine de la thermique du bâtiment ([Rabouille et al. \(2013\)](#)). Au rythme auquel les méthodes d'analyse de sensibilité et d'échantillonnage se développent, ce choix ne vise pas à être le plus optimisé en termes de temps de calcul. Les nouvelles variantes, extensions, alternatives pour chaque méthode qui font régulièrement l'objet d'articles permettraient sûrement de faire converger plus vite les résultats. Cependant, les deux méthodes retenues ont fait leurs preuves et leurs algorithmes sont disponibles dans des bibliothèques numériques spécialisées dans les analyses de sensibilité telle que SALib (Sensitivity Analysis LIBrary) pour Python (plus d'informations sur cette bibliothèque dans [Herman et Usher \(2017\)](#)). Dans ces travaux, la vérification de la convergence des résultats avec un nombre raisonnable d'évaluations du modèle sera faite.

Les indicateurs développés permettront d'agréger les résultats fournis par les analyses de sensibilité et serviront à évaluer l'impact des actions des occupants sur le confort d'été dans un bâtiment en tenant compte de multiples combinaisons d'actions possibles. Ces indicateurs auront alors pour vocation :

- d'évaluer la robustesse d'une conception de bâtiment face à des actions possibles des habitants
- et de retrouver des éco-comportements permettant de réguler la température dans un logement afin de le rendre plus confortable et de limiter l'utilisation de solutions technologiques coûteuses.

Avec la méthode d'analyse de sensibilité choisie, les indices de sensibilité ne sont pas signés. La démarche proposée par [Spitz \(2012\)](#) pour signer les indices de Sobol ne sera pas retenue car elle requiert des évaluations supplémentaires du modèle. Une démarche différente sera alors proposée dans cette étude et sera utilisée pour construire les indicateurs.

Le Chapitre 3 présente en détail les différentes étapes de la méthodologie mise en place dans le cadre de ces travaux de thèse pour parvenir aux indicateurs recherchés. Les indicateurs seront mis en application dans le Chapitre 4.

3

Application de l'analyse de sensibilité temporelle à la problématique du confort d'été dans un bâtiment résidentiel

Ce chapitre présente la méthodologie développée dans ces travaux de thèse permettant d'aboutir à la création de 5 nouveaux indicateurs. Ces indicateurs d'échauffement, de rafraîchissement, d'échauffement global, de rafraîchissement global et de résilience permettent d'évaluer la capacité d'un bâtiment à limiter la hausse de la température due à une action ou, au contraire, d'évaluer la capacité d'un bâtiment à bénéficier d'une action pour être rafraîchi. La persistance de l'impact des actions sur le bâtiment est également évaluée. Le développement de ces indicateurs est basé sur les analyses de sensibilité temporelles. Ce chapitre présente le déroulement de la méthodologie sur une maison individuelle BEPOS située en région parisienne.

Sommaire

3.1	Description de la méthodologie	57
3.2	Présentation du cas test et de son modèle	58
3.2.1	Description du cas test	58
3.2.2	Hypothèses de modélisation	61
3.2.3	Confrontation aux résultats expérimentaux	63
3.2.4	Présentation du fichier météo	66
3.3	Déroulement de la méthodologie sur une maison existante	67
3.3.1	Sélection des actions des habitants	67
3.3.2	Hypothèses relatives à la propagation des actions dans le modèle	72
3.3.3	Étude des combinaisons d'actions générées par l'échantillonnage LHS	78
3.3.4	Mise en évidence des risques de surchauffe et du potentiel d'amélioration	81
3.3.5	Étude des indices de sensibilité	86
3.3.6	Étude des variances partielles	90
3.3.7	Convergence des résultats	93
3.3.8	Introduction des variances partielles signées	95
3.3.9	Vers de nouveaux indicateurs	101

3.1 Description de la méthodologie

La méthodologie développée vise à évaluer la réponse thermique d'un bâtiment à des actions des occupants en période estivale en termes d'intensité mais également du point de vue temporel. Pour cela, le parcours de l'état de l'art montre qu'une approche utilisant des analyses de sensibilité temporelles est prometteuse. Pour ce faire, les outils de simulation thermique dynamique sont des outils puissants. Le déroulement de la méthodologie sur un cas test est l'objet de ce présent chapitre.

L'étude consiste d'abord à créer un échantillon à propager dans un modèle numérique de bâtiment. Cet échantillon reflète la variabilité des combinaisons d'actions des habitants qui seront évaluées. Pour cela, des actions sont sélectionnées et une plage de variation leur est associée dans le but d'introduire de la variabilité entre les combinaisons. La sélection des actions ainsi que leur plage de variation sont présentées dans le Chapitre 3.3.1. Cet échantillon est obtenu à partir d'une méthode d'échantillonnage performante, la méthode LHS décrite dans le Chapitre 2.

Une fois les échantillons propagés dans le modèle, il est possible d'observer la dispersion des valeurs de la sortie du modèle induite par les différentes combinaisons et ainsi de justifier du rôle et de l'existence d'éco-comportements capables d'améliorer le confort thermique en période estivale. La variable de sortie observée est la température opérative intérieure horaire assimilée à la température ressentie par les occupants. L'étude de la variabilité de cette sortie se trouve au Chapitre 3.3.4.

Ensuite, une analyse de sensibilité sera appliquée avec la méthode d'analyse de sensibilité globale RBD-FAST basée sur la décomposition de la variance décrite également dans le Chapitre 2. Plus précisément, de multiples analyses de sensibilité seront lancées, une pour chaque pas de temps pour lequel la variable de sortie est calculée. Cette méthodologie est capable de supporter des actions ayant des scénarios d'activité différents. Les Chapitres 3.3.5, 3.3.6 et 3.3.8 présentent les résultats de ces analyses.

Enfin, des indicateurs reflétant la capacité du bâtiment à limiter la hausse de température ou favoriser la diminution de la température induites par les actions, en intensité et dans la durée, sont développés dans le Chapitre 3.3.9 à partir des résultats des analyses de sensibilité.

3.2 Présentation du cas test et de son modèle

3.2.1 Description du cas test

Le choix du cas test de cette étude s'est porté sur une maison individuelle construite en région Île-de-France. Faisant partie du catalogue d'un constructeur de maisons individuelles français, la maison est de bonne compacité, à étages et donc adaptée à des terrains de petite surface. Ces caractéristiques font que ce type de bâtiment est répandu.

Projet COMEPOS

Cette maison en particulier est un démonstrateur construit dans le cadre du projet COMEPOS (Conception et Construction Optimisée de Maisons à Énergie POSitive) et maintenant habité. Le projet COMEPOS consiste à développer le concept de maison individuelle à énergie positive tous usages (usages réglementaires et usages dits « mobiliers » non réglementaires) avec une réelle maîtrise des surcoûts, dans le cadre de l'évolution de la réglementation thermique à l'horizon 2020. Il a comme objectifs de (Comepos (2019)) :

- Réaliser les études, la simulation, la conception technologique, le monitoring et le retour d'expérience de bâtiments démonstrateurs, ainsi que le développement de systèmes technologiques innovants qui y seront intégrés.
- Montrer la faisabilité du concept via la réalisation de 25 bâtiments démonstrateurs habités qui seront répartis sur l'ensemble du territoire français, en partenariat avec une dizaine de constructeurs adhérents à la LCA-FFB (Les Constructeurs et Aménageurs de la Fédération Française du Bâtiment), anciennement l'Union des Maisons Françaises.

Enveloppe et systèmes

La maison est sur 4 niveaux, le vide-sanitaire, le rez-de-chaussée, l'étage et des combles non-aménagés pour une surface habitable totale de 80 m^2 . L'architecture de cette maison est classique mais est optimisée en fonction de l'exposition des parois. En façade nord, des menuiseries avec triple vitrage ont été installées alors qu'en façade sud, des brise-soleil d'une profondeur de 1 m ont été posés au-dessus de menuiseries double vitrage. En hiver, les déperditions thermiques côté nord sont limitées, en été les gains solaires sont maîtrisés. La Figure 3.1 montre l'emplacement des différentes fenêtres de cette habitation en fonction des orientations du bâtiment.

L'enveloppe de la maison a été réalisée en parpaings et l'isolation intérieure est composée de polyuréthane (10 cm) et de laine minérale (5 cm). L'isolation entre l'étage et les

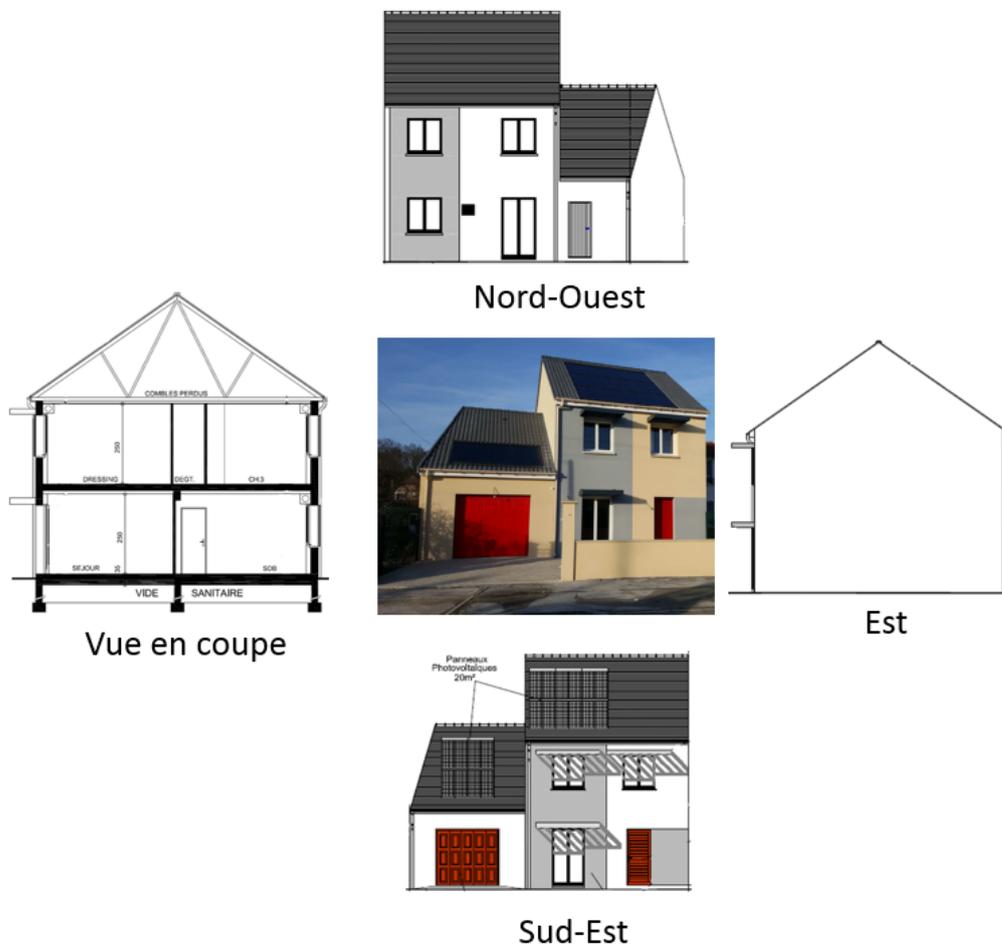


Figure 3.1 – Disposition des ouvertures du bâtiment suivant les différentes façades et vue en coupe du bâtiment

combles en laine minérale (40 cm) et polyuréthane (5 cm) et entre le rez-de-chaussée et le vide-sanitaire en polyuréthane (10 cm) permettent respectivement de limiter les déperditions thermiques par le plancher haut et le plancher bas. L'isolation du plancher bas est située entre la chape (8 cm) et la dalle de béton (16 cm). La technique constructive utilisée limite alors l'inertie thermique de cette maison. Un test de perméabilité à l'air a été réalisé et donne un coefficient de perméabilité sous 4 Pascals de $0.51 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$, résultat conforme à la réglementation thermique française en vigueur.

Le système de ventilation double-flux installé auquel est couplé un système de chauffage par résistance électrique assure les besoins de chauffage et de qualité de l'air de cette habitation et joue également un rôle sur le confort d'été grâce à la possibilité de surventilation mécanique nocturne. Le système de ventilation autoréglable est équipé d'un bypass automatique, d'un échangeur pour lequel le rendement affiché par le constructeur est de 85% et de différents modes de ventilation associés à différents débits pouvant être adoptés. En fonctionnement normal et pour répondre aux normes de ventilation, le débit de renouvellement d'air, qui a été mesuré lors d'une campagne de mesure en période hors-chauffe, est de $90 \text{ m}^3/\text{h}$ soit un renouvellement d'air de $0,5 \text{ vol}/\text{h}$. En débit de pointe, l'équipement peut fournir jusqu'à $150 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0,9 \text{ vol}/\text{h}$).

Ces différentes caractéristiques constructives et techniques confèrent au bâtiment une qualité de bâtiment dit BBC (Bâtiment Basse Consommation). La maison a également vocation à être à énergie positive car elle comporte en toiture 6 kWc de panneaux photovoltaïques et une batterie de stockage de 5 kWh .

La régulation de la température de chauffage est indépendante entre chaque pièce de l'habitation. Chaque pièce dispose d'un thermostat et d'une bouche de soufflage dédiée pour laquelle se trouve en amont de la gaine de ventilation une résistance chauffante. Les volets roulants se pilotent également indépendamment suivant les pièces.

En Annexe A, une fiche descriptive présente les différentes caractéristiques constructives, les systèmes de production de chaleur, d'eau chaude sanitaire, de production et de stockage d'énergie photovoltaïque, les principes des systèmes de régulation et de pilotage installés ainsi que l'instrumentation mise en place.

3.2.2 Hypothèses de modélisation

Le logiciel utilisé pour réaliser la simulation thermique dynamique de ce bâtiment est le logiciel EnergyPlus.

Enveloppe

La variable de sortie d'intérêt est la température opérative dans chaque pièce de la maison. Par conséquent, l'humidité n'a pas été prise en compte dans ce modèle. La température opérative dans une zone correspond à la moyenne de la température d'air et de la température radiante dans cette même zone. La température d'air étant supposée uniforme dans une zone et la température radiante étant assimilée à la moyenne des températures de surface des parois de la zone pondérée par leur surface et leur émissivité respectives. L'émissivité des matériaux composant les couches intérieures de chaque zone a été fixée à 0,9, valeur classique dans le bâtiment. Dans les parois, pour les transferts de chaleur par conduction, la méthode « CTF » (Conduction Transfer Functions) est utilisée pour résoudre l'équation de la chaleur. Les ponts thermiques ont été modélisés de manière simplifiée grâce à des murs fictifs, sans masse, ayant une résistance déperditive équivalente à des niveaux de ponts thermiques attendus dans les maisons BBC. L'infiltration d'air à travers les parois fait intervenir le modèle aéraulique et est donc présentée dans la partie « Ventilation naturelle » ci-dessous.

Zonage thermique

Pour évaluer la température opérative dans chaque pièce, le modèle EnergyPlus du cas test retenu comporte 10 zones thermiques soit une zone thermique pour chaque pièce de la maison (le séjour-cuisine, la salle de bains, le dressing, les trois chambres), en plus d'une zone pour le hall desservant les différentes pièces à l'étage ainsi qu'une zone thermique par zone tampon (le garage, les combles et le vide-sanitaire). Les Figures 3.2a et 3.2b permettent de visualiser les différentes zones thermiques modélisées sur les niveaux habités du bâtiment.

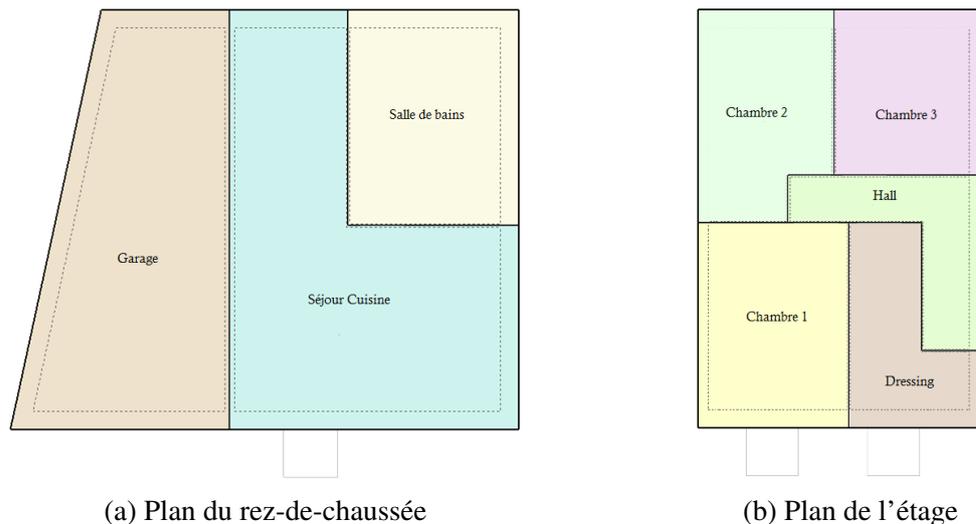


Figure 3.2 – Visualisation du zonage thermique du rez-de-chaussée et de l'étage

Ventilation mécanique

Le système de ventilation mécanique contrôlée (VMC) double flux a été assimilé à un renouvellement des volumes d'air du séjour-cuisine, des trois chambres et du dressing. Le taux de renouvellement d'air fixé est celui issu de la campagne de mesure ($90 \text{ m}^3/h$ soit environ $0,5 \text{ vol}/h$) et est réparti dans les différentes zones proportionnellement aux surfaces des différentes pièces. La ventilation mécanique ainsi modélisée ne s'appuie pas sur un modèle aéraulique. De plus, en été, dans le bâtiment, le bypass s'enclenche lorsque les conditions de température sont favorables au rafraîchissement c'est à dire quand la température intérieure est supérieure à 23°C et que la température extérieure est plus froide que la température intérieure. Le bypass est coupé quand la température extérieure descend en dessous de 10°C . Lorsque le bypass n'est pas enclenché, il y a un échange thermique entre l'air provenant de l'extérieur et celui provenant de l'intérieur grâce à l'échangeur. Du point de vue thermique, la VMC double-flux ayant un rendement de 85%, cela revient à considérer que la ventilation apporte 15% d'air provenant de l'extérieur puisque 85% de la chaleur est recyclé. Pour modéliser ce fonctionnement, quand un rafraîchissement est possible, le débit imposé de renouvellement d'air est donc modulé à 15% de la valeur initiale en fonction des conditions de températures entre l'intérieur et l'extérieur pour chacune des zones concernées.

Ventilation naturelle

La ventilation naturelle vient se rajouter à la ventilation mécanique. Le calcul des différentes pressions par le module aéraulique est impacté par les débits imposés par la ventilation mécanique mais de manière limitée à cause des faibles débits en jeu avec la VMC. Dans cette étude, seule la ventilation naturelle par tirage thermique est modélisée. En effet, la prise en compte des mouvements d'air dans le bâtiment induits par le vent re-

quiert des coefficients de pression orientant les courants aérodynamiques. Ces coefficients de pression sont difficiles à estimer avec fiabilité. De plus, ce choix permet d'être conservateur vis à vis des débits résultants de ventilation naturelle. Pour le tirage thermique, le gradient de pression est induit par la différence de densité de l'air due à la différence de température et par la différence de hauteur entre les ouvertures d'entrée et de sortie. Le débit d'air à travers un ouvrant entre deux zones intérieures ou entre l'intérieur et l'extérieur dépend de la « surface utile » de l'ouvrant. En effet, au passage des ouvrants, les lignes de champ se contractent si bien que la surface de passage se voit significativement réduite. Des valeurs type sont fréquemment employées et pour des ouvertures à la française, un coefficient de décharge de 0,60 a été retenu. Pour les portes intérieures, le coefficient de décharge a été fixé à 0,65. Un détalonnage des portes à 2cm a également été modélisé. Dans ce modèle, aucun échange aéraulique entre les étages n'est permis.

Les débits d'infiltration par l'enveloppe du bâtiment sont évalués, comme la ventilation naturelle, à chaque pas de temps de la simulation pour équilibrer les équations de pression en jeu. Les défauts d'étanchéité à l'air sont modélisés par des fissures. Le coefficient de perméabilité à l'air de chacun de ces défauts a été déterminé afin d'obtenir des valeurs cohérentes de débit d'infiltration pour une maison BBC.

Environnement

Les informations supplémentaires à fournir pour la mise en place du modèle concernent l'environnement du bâtiment. Pour les murs en contact avec le sol comme les murs du vide-sanitaire, la température du sol a été laissée à la valeur par défaut (18°C). Le sol situé devant une paroi réfléchit une partie du rayonnement solaire, le coefficient de réflexion du sol pour le rayonnement solaire (albédo) est fixé à 0,2 qui est une valeur communément admise en milieu urbain. Aucun masque proche pouvant apporter de l'ombrage en fonction de la course du soleil n'a été modélisé.

3.2.3 Confrontation aux résultats expérimentaux

Le comportement du modèle ainsi créé peut être confronté à des mesures afin de vérifier que la réponse du modèle, sous des sollicitations identiques à celles mesurées, est proche du comportement réel du bâtiment.

Identification d'une période d'absence

Les capteurs installés dans ce bâtiment démonstrateur ne permettant pas d'obtenir les informations nécessaires pour reproduire dans le modèle le comportement des occupants en période d'occupation, la dynamique du modèle est regardée sur une période d'absence des occupants. L'analyse des données de consommation électrique pour les usages non

réglementaires et du taux de CO_2 dans la pièce séjour-cuisine permet d'identifier les périodes d'absence. En particulier, sur les mesures de l'année 2018, une période d'absence de 12 jours a été repérée. Les dates de départ et de retour des occupants sont facilement visualisables par le changement brutal de dynamique des valeurs remontées par les deux capteurs. Sur la Figure 3.3, sur la période allant du 08 juillet au 19 juillet, seule la consommation des équipements électriques en veille est visualisée ainsi que, probablement, le réfrigérateur/congélateur et de quelques autres équipements de ce type. Cette valeur est aux alentours de 90 W. Sur cette même période, le taux de CO_2 observé est celui de l'air extérieur, proche de 400 ppm.

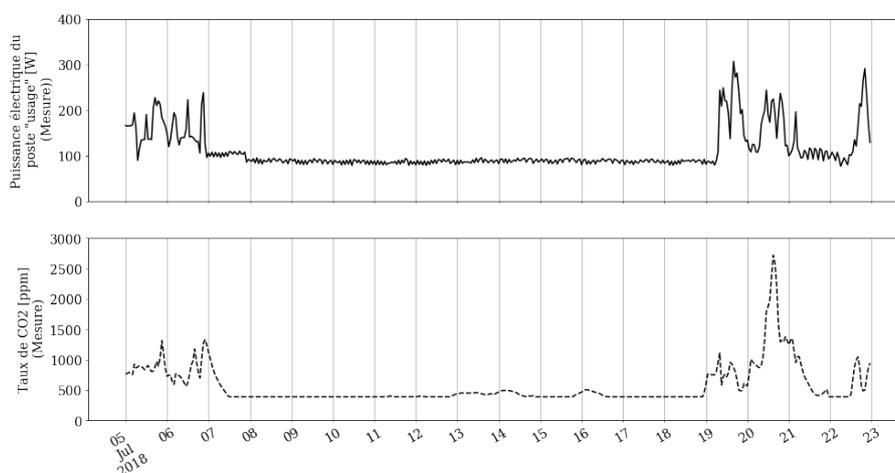


Figure 3.3 – Identification d'une période d'absence du 08 au 19 juillet grâce à l'analyse de l'évolution de la puissance électrique des usages non réglementaires (en haut) et du taux de CO_2 dans le séjour-cuisine (en bas)

Une enquête menée auprès des occupants permet de compléter les informations non fournies par les capteurs. Durant cette période d'absence, les volets et fenêtres sont fermés et la ventilation arrêtée. La consommation électrique des équipements en veille de 90 W a été introduite dans le modèle.

Déroulement du test

Les capteurs de température réalisent des mesures de température d'air, la sortie de simulation regardée est donc la température d'air dans la zone. Les températures mesurées sont moyennées sur l'heure pour être comparées aux valeurs horaires simulées. Le fichier météo utilisé pour modéliser les sollicitations extérieures du bâtiment est celui mesuré. En amont de la période d'absence, la température intérieure est fixée à 26°C dans le modèle afin de réduire l'offset entre la température mesurée et simulée dû à l'absence de sollicitations internes avant la période de départ des occupants dans le modèle. La confrontation entre les données mesurées et les résultats de simulation est réalisée pour la pièce à vivre, entre le 09 juillet le 19 juillet soit un jour après le départ des occupants. Ce décalage d'une

journée permet de retarder la confrontation à une période où la mesure est potentiellement moins impactée par les sollicitations de la phase occupation. La Figure 3.4 présente les résultats obtenus.

Résultats de la confrontation

L'analyse de ces résultats montre que le modèle a un comportement proche du bâti-

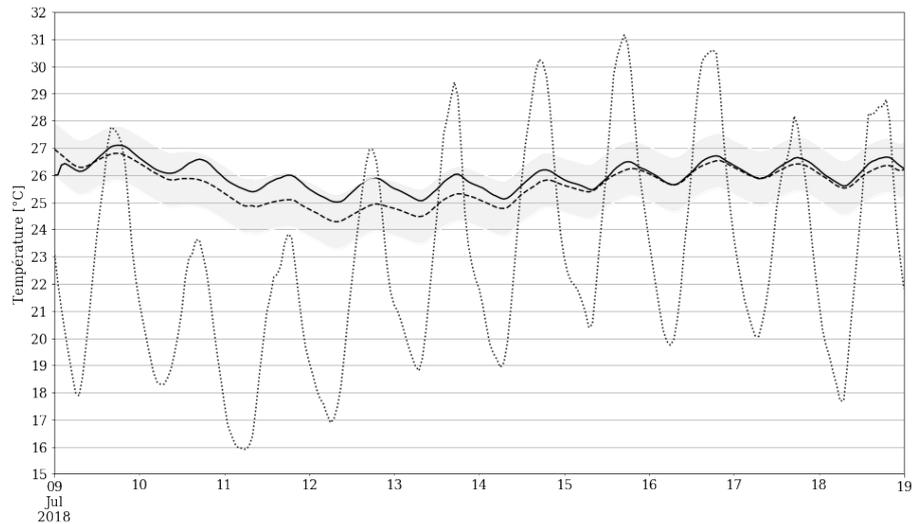


Figure 3.4 – Évolution de la température d'air simulée (trait plein), mesurée (trait discontinu) et plage d'incertitude de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ du capteur dans la pièce séjour-cuisine. La température d'air extérieure mesurée est tracée en trait pointillé

ment test. La température simulée reste dans la plage d'incertitude du capteur de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Les écarts observés peuvent être expliqués par de multiples phénomènes qui peuvent se combiner : le modèle physique imparfait, les erreurs dans les hypothèses de simulation présentées au Chapitre 3.2.2, des écarts entre les sollicitations externes réelles et mesurées (simulées), des erreurs de mesure et également le biais de mesure lié à la position du capteur. Néanmoins, les écarts entre les grandeurs observées restent faibles : la RMSE (Root Mean Square Error) calculée par la formule 3.1 est de $0,54^{\circ}\text{C}$, avec n le nombre d'observations, P_i la valeur de la température d'air prédite, simulée et O_i la valeur de la température d'air observée, mesurée à l'heure i . Cet indicateur mesure la moyenne des écarts quadratiques entre les valeurs observées et simulées sur la totalité des 264 observations ($11 \text{ jours} \times 24h$).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (3.1)$$

Au vu des résultats satisfaisants du modèle, celui-ci est utilisé dans le reste de l'étude.

3.2.4 Présentation du fichier météo

Durant l'été 2018, les températures ont été chaudes sur l'ensemble de la France, notamment sur la moitié nord où elles ont été en moyenne 2 à 4°C au-dessus des valeurs de saison. Du 24 au 27 juillet, la France a connu un pic de chaleur qui a touché plus particulièrement le nord et l'est du pays. Après un bref refroidissement les 28 et 29, un nouvel épisode caniculaire a débuté le 30 et s'est poursuivi jusqu'au 8 août. La Figure 3.5 situe l'été 2018 par rapport aux étés précédents depuis 1959 vis à vis de leur écart à la normale de la moyenne des températures et l'écart à la normale des précipitations.

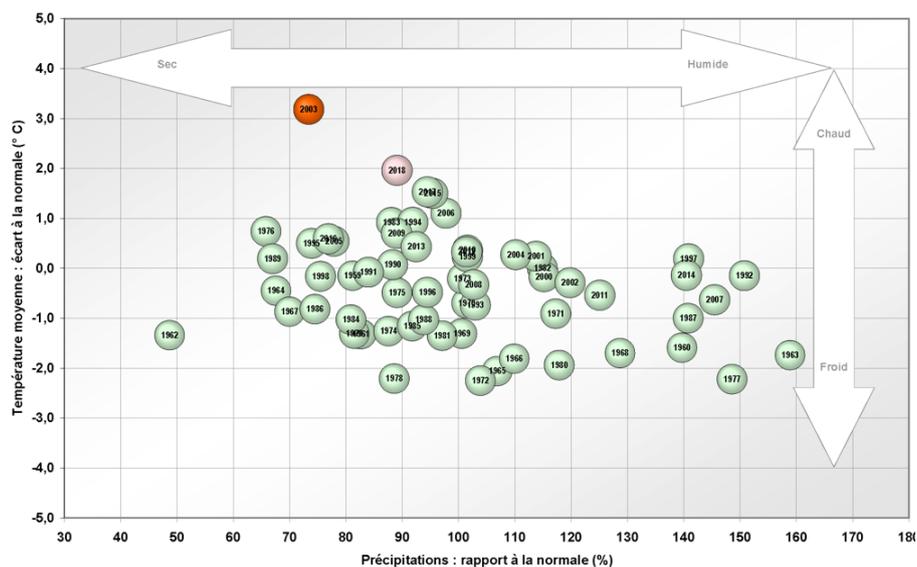


Figure 3.5 – Températures et précipitations en été de 1959 à 2018, [MétéoFrance \(2018a\)](#)

L'été 2018, et plus particulièrement la période allant du 24 juillet au 08 août, est une période appropriée pour mener une étude sur la gestion du confort estival dans un bâtiment non équipé de système de climatisation. L'évolution de la température et de l'ensoleillement mesurés a été tracée sur la période du 24 juillet au 08 août sur la Figure 3.6. La mesure de température a été prise en façade nord du bâtiment, la mesure d'ensoleillement, quant à elle, provient d'une station MétéoFrance d'un aéroport à proximité du bâtiment (18km). Les températures journalières maximales sont comprises entre 27,3°C et 36,4°C et les températures minimales entre 19,0°C et 22,9°C.

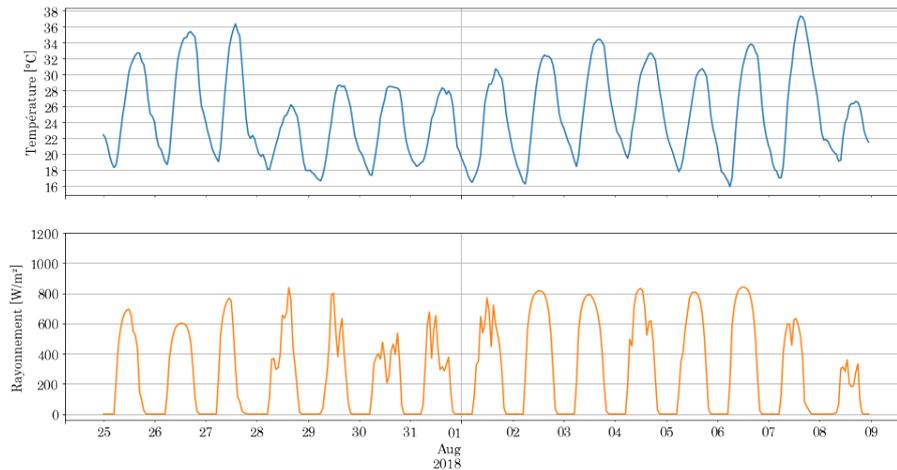


Figure 3.6 – Profils de température d’air et de rayonnement solaire direct relevés durant la période de chaleur

3.3 Déroulement de la méthodologie sur une maison existante

3.3.1 Sélection des actions des habitants

La méthodologie vise à évaluer comment une action des habitants influence l’équilibre thermique à l’intérieur d’un bâtiment, et ce, au cours du temps. Certaines actions amènent l’occupant à interagir avec le bâti et les systèmes installés. Il peut alors, par exemple, s’agir d’une interaction avec les fenêtres ou bien avec le système de ventilation.

A titre d’exemple, pour illustrer les apports de la méthodologie, des actions ont été sélectionnées. Ces actions sont relatives aux ouvertures de fenêtres, aux ouvertures des volets, à l’utilisation d’équipements pour des usages non réglementaires et à l’utilisation de la surventilation mécanique nocturne.

Segmentation des actions sur une journée

Afin d’étudier l’influence d’une action sur le bâti suivant le moment de la journée où elle a lieu, les actions sont segmentées en fonction des moments de la journée. Le scénario d’actions étudié dans le cadre du cas test vise à correspondre à une famille présente le matin, le midi et le soir et absente entre ces périodes. L’ouverture des fenêtres se fait 30 minutes par jour, réparties sur trois périodes de 10 minutes dans la journée. Avant chaque période de présence et d’absence, les protections solaires peuvent être laissées dans une position différente mais identique pour tous les vitrages. L’utilisation d’équipements a lieu en période de présence. En période d’absence, l’existence d’équipements en mode veille est possible. Enfin, l’utilisation de la surventilation mécanique nocturne est égale-

ment une action dont l'impact sur le bâti est étudié.

Les scénarios de présence et d'actions sont retranscrits respectivement dans les Tableaux 3.1 et 3.2. Les actions sont répétées d'une journée sur l'autre ce qui permettra de suivre en fonction de la météo leurs influences. La segmentation des actions conduit à étudier 12 actions bien distinctes.

Tableau 3.1 – Scénarios de présence incorporés dans la méthodologie

Heures de la journée	00h	01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
Scénario d'occupation - Zone jour																								
Scénario d'occupation - Zone nuit																								

Tableau 3.2 – Scénarios d'action utilisés pour l'application de la méthodologie

Heures de la journée	00h	01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
1 - Ouverture des fenêtres le matin								X																
2 - Ouverture des fenêtres le midi													X											
3 - Ouverture des fenêtres le soir																								
4 - Ouverture des volets le matin																								
5 - Ouverture des volets le midi																								
6 - Ouverture des volets l'après-midi																								
7 - Ouverture des volets le soir																								
8 - Utilisation d'équipements le matin																								
9 - Utilisation d'équipements le midi																								
10 - Utilisation d'équipements le soir																								
11 - Fonctionnement d'équipements en mode veille																								
12 - Utilisation de la surventilation mécanique nocturne																								

Lois de distribution des actions en interaction avec le bâti

L'échantillonnage par LHS nécessite d'associer à chaque action une loi de probabilité relative à l'intensité que l'action peut prendre. Le principe suivi dans cette méthodologie est de ne pas favoriser des comportements de type ON/OFF dans l'étude des impacts. En effet, les situations d'enclenchement ou d'arrêt d'une action correspondent à des configurations particulières. Au contraire, on considère que l'intensité de chaque action liée à une interaction avec le bâti ou les systèmes installés peut varier entre les bornes limites de fonctionnement de l'installation sur lesquelles l'occupant agit, et ce, de manière équiprobable pour toutes les valeurs entre ces bornes. Il sera alors possible de juger de manière exhaustive l'impact de la variation de l'intensité d'une action sur la température intérieure.

La Figure 3.7 illustre l'intérêt de cette approche. Elle montre deux profils de température opérative obtenus par la simulation de deux cas distincts : dans l'un, tous les volets sont ouverts, dans l'autre, tous fermés. Entre les deux simulations, toutes les autres actions sont inchangées. La température opérative obtenue dans le cas où les volets sont ouverts est bien sûr supérieure à celle obtenue dans le cas où les volets sont fermés. La question se pose alors de savoir si les écarts de température observés, représentant dans ce cas l'influence sur la température de l'ouverture des volets à 100%, sont identiques dans toutes les configurations c'est à dire quel que soit l'état des autres actions.

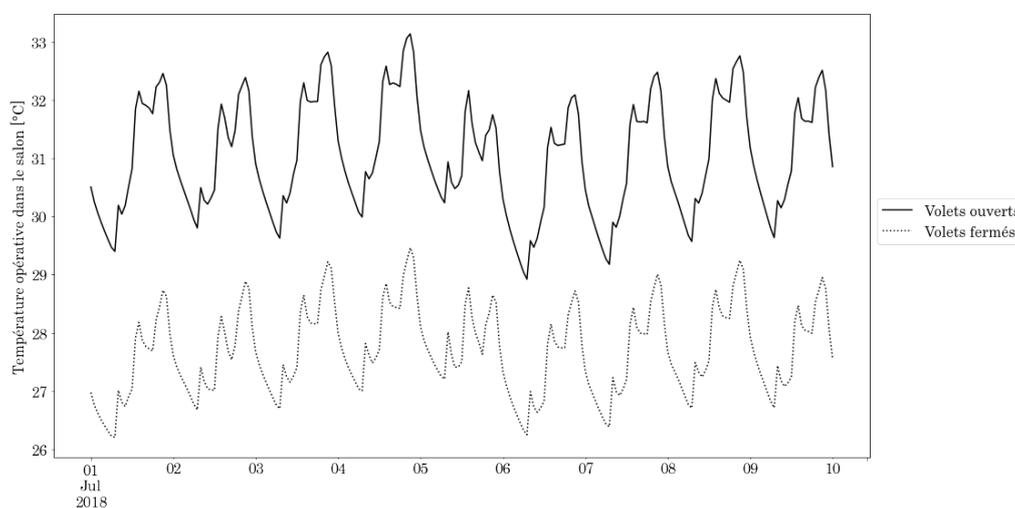


Figure 3.7 – Profils de température opérative dans le séjour-cuisine lorsque les volets sont entièrement ouverts et entièrement fermés

Dans l'optique de mieux comprendre l'impact des actions sur le bâti, les actions relatives aux ouvertures de fenêtres ont une intensité qui s'étale sur une plage de variation allant de 0% de taux d'ouverture à 100%. Les actions relatives aux ouvertures de volets se font sur la même plage de variation soit de 0% à 100% de taux d'ouverture. Une logique identique a été conservée pour la surventilation mécanique nocturne. Dans le cas où les

habitants ont le choix d'enclencher ou non la surventilation mécanique, le débit associé à cette action peut varier du débit de base au débit de pointe liée à la surventilation. En réalité, les occupants n'ont généralement pas la liberté d'utiliser une vitesse intermédiaire à cause de contraintes liées aux ventilateurs. Cependant, afin d'évaluer l'influence de la variation du débit de surventilation nocturne sur la température intérieure, des débits intermédiaires sont permis dans cette étude.

Cas particulier des actions relatives aux équipements

Les actions relatives à l'utilisation d'équipements pour des usages non réglementaires ne sont pas limitées dans un bâtiment. Au lieu d'énumérer et de modéliser chaque équipement possiblement utilisé dans un logement, des ratios moyens issus de la réglementation thermique française sont utilisés (RT2012). La réglementation définit un ratio de $4,6 \text{ W/m}^2$ lors d'utilisation d'équipements et un ratio de $1,1 \text{ W/m}^2$ correspondant aux équipements restant en veille. Ces ratios ont été calculés en considérant des équipements de cuisine, de lavage, de réfrigération, d'audiovisuel et d'informatique. De plus, la chaleur dégagée par ces équipements est de la chaleur dite sensible, plus précisément, la réglementation précise que cette chaleur sensible est émise pour 50% par échanges convectifs. Ces ratios sont des valeurs moyennes, le choix a été fait de faire varier les puissances d'équipements en mode veille et en période active de plus ou moins 50% autour des valeurs proposées par la réglementation afin d'introduire une variabilité dans les actions associées.

Le Tableau 3.3 récapitule l'ensemble des actions associées à leur plage de variation.

Tableau 3.3 – Plages de variation des actions

Actions	Distribution	Moyenne	Intervalle	Min.	Max.
1 - Ouverture des fenêtres le matin	Uniforme	50%	+/-100%	0%	100%
2 - Ouverture des fenêtres le midi	Uniforme	50%	+/-100%	0%	100%
3 - Ouverture des fenêtres le soir	Uniforme	50%	+/-100%	0%	100%
4 - Ouverture des volets le matin	Uniforme	50%	+/-100%	0%	100%
5 - Ouverture des volets le midi	Uniforme	50%	+/-100%	0%	100%
6 - Ouverture des volets l'après-midi	Uniforme	50%	+/-100%	0%	100%
7 - Ouverture des volets le soir	Uniforme	50%	+/-100%	0%	100%
8 - Utilisation d'équipements le matin	Uniforme	4.6 [W/m ²]	+/-50%	2.3 [W/m ²]	6.9 [W/m ²]
9 - Utilisation d'équipements le midi	Uniforme	4.6 [W/m ²]	+/-50%	2.3 [W/m ²]	6.9 [W/m ²]
10 - Utilisation d'équipements le soir	Uniforme	4.6 [W/m ²]	+/-50%	2.3 [W/m ²]	6.9 [W/m ²]
11 - Fonctionnement d'équipements en mode veille	Uniforme	1.1 [W/m ²]	+/-50%	0.55 [W/m ²]	1.65 [W/m ²]
12 - Utilisation de la surventilation mécanique nocturne	Uniforme	120 [m ³ /h]	+/-25%	90 [m ³ /h]	150 [m ³ /h]

Une fois que les lois de distribution sont associées à chacune des actions, l'échantillonnage par LHS peut être réalisé. Les échantillons ainsi créés sont par la suite propagés dans

le modèle thermique du bâtiment.

3.3.2 Hypothèses relatives à la propagation des actions dans le modèle

Le plan d'expériences est ensuite propagé dans le modèle numérique du bâtiment. Il fixe l'intensité de chacune des actions à modéliser. Cette étape amène une complexité et des hypothèses de modélisation supplémentaires. En effet, par exemple, les modèles créés avec EnergyPlus ne permettent pas de fixer des taux d'occultation autres que 0% ou 100%. Il faut donc adapter la modélisation pour permettre l'analyse de sensibilité. Ce chapitre présente les hypothèses relatives à la modélisation des différents comportements pour permettre l'analyse de sensibilité.

Contrôle du taux d'ouverture des volets

La question de la modélisation de protections solaires avec un taux d'ouverture variable se pose. D'après la documentation d'EnergyPlus ([EnergyPlus \(2019a\)](#)), lorsqu'une protection solaire est présente, elle est soit rétractée, soit activée. Quand elle est rétractée, elle ne couvre aucune partie de la fenêtre. Lorsqu'elle est activée, elle recouvre la totalité de la partie vitrée de la fenêtre (mais pas le cadre). La complexité dans la modélisation de cet objet réside dans de nombreux facteurs dont le problème de définition de la surface vitrée à couvrir qui dépend de la nature des volets (roulants, à battants...), de la modélisation des échanges thermiques pouvant avoir lieu entre la surface vitrée et le dispositif d'occultation (résistance thermique additionnelle, convection dans la lame d'air entre les deux objets) et de la détermination de l'irradiation solaire incidente sur la surface vitrée alors que les protections mobiles ne sont pas totalement en place ou totalement absentes.

Pour modéliser des protections solaires partiellement fermées, plusieurs approches sont possibles. Une première approche consiste à faire varier le facteur solaire du vitrage ou de la protection en fonction du taux d'occultation. Le facteur solaire correspond à la part du rayonnement solaire transmise par un élément. Cette méthode a été employée dans [Lehmann et al. \(2013\)](#). D'autres auteurs, comme [Shen et al. \(2014\)](#), préfèrent modéliser les protections solaires sous forme de protection solaire avec des lames inclinables. En faisant varier le taux d'inclinaison, il est alors possible de modifier le taux d'occultation. Dans cette étude, comme proposé par Energyplus et déjà utilisé par [O'Brien et al. \(2010\)](#), pour modéliser un volet qui ne recouvre qu'une partie de la fenêtre, la fenêtre a été subdivisée verticalement en plusieurs fenêtres distinctes posées les unes sur les autres. La protection solaire n'est alors appliquée que sur certaines de ces sous-fenêtres pour atteindre le taux d'occultation sur l'ensemble de la paroi vitrée souhaité. Le découpage est visible sur la Figure 3.8 présentant la modélisation 3D du bâtiment.

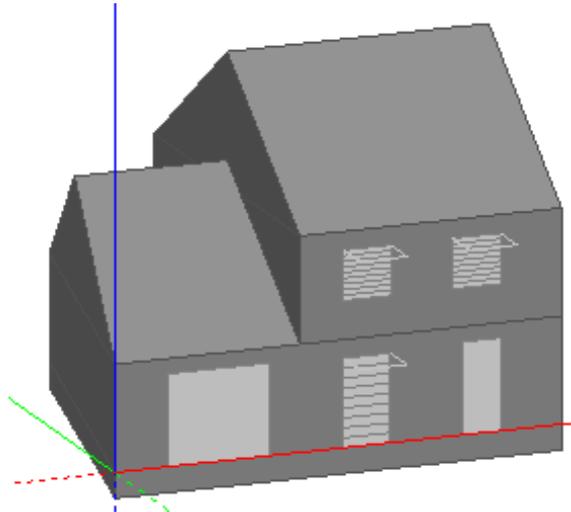


Figure 3.8 – Représentation 3D du bâtiment test modélisé

Dans cette étude, chacune des fenêtres du bâtiment, visible sur la Figure 3.1, a été découpée dans le modèle en 9 fenêtres de surface égale. Seule la partie vitrée des fenêtres est modélisée. Ce découpage permet de fermer les volets d'une fenêtre avec un taux de fermeture variant avec un pas de 11,1%. L'échantillonnage donne, pour le taux d'ouverture des volets, une valeur x comprise entre 0 et 1 (Chapitre 3.3.1). Suivant la valeur de x , dix cas sont possibles :

- $0,9 \leq x < 1 \Rightarrow$ les volets des 9 sous-fenêtres sont fermés, le taux d'occultation est de 100%,
- $0,8 \leq x < 0,9 \Rightarrow$ les volets des 8 sous-fenêtres en partant du haut sont fermés, seul le volet de la sous-fenêtre du bas est ouvert, le taux d'occultation est de 88,9%,
- \dots ,
- $0,1 \leq x < 0,2 \Rightarrow$ seul le volet de la sous-fenêtre supérieure est fermé, le taux d'occultation est de 11,1%,
- $x < 0,1 \Rightarrow$ les volets des 9 sous-fenêtres sont ouverts, le taux d'occultation est de 0%.

De cette façon, la probabilité de chacun des dix évènements est identique. Les actions relatives aux taux d'ouverture sont alors traitées comme des entrées discrètes pouvant prendre 10 valeurs. Les sous-fenêtres ayant une position identique possèdent le même scénario d'occultation. Ainsi, à un moment donné de la journée, toutes les fenêtres du bâtiment sont occultées de façon identique. Ce scénario d'occultation varie suivant les différents moments de la journée, le matin, le midi, l'après-midi et le soir. La nuit, tous les volets sont maintenus fermés. Grâce au calcul de l'espérance (3.3), il faut s'attendre à ce que, en moyenne, avec 1000 échantillons, le nombre de combinaisons d'actions pour

lesquelles les variables associées aux volets soient comprises entre 0 et 0,1 pour tous les moments de la journée soit inférieur à 1. Ainsi, l'évènement tous les volets sont ouverts à tous les moments de la journée n'est que faiblement représenté dans l'échantillon comme discuté au Chapitre 3.3.1.

Contrôle du taux d'ouverture des fenêtres

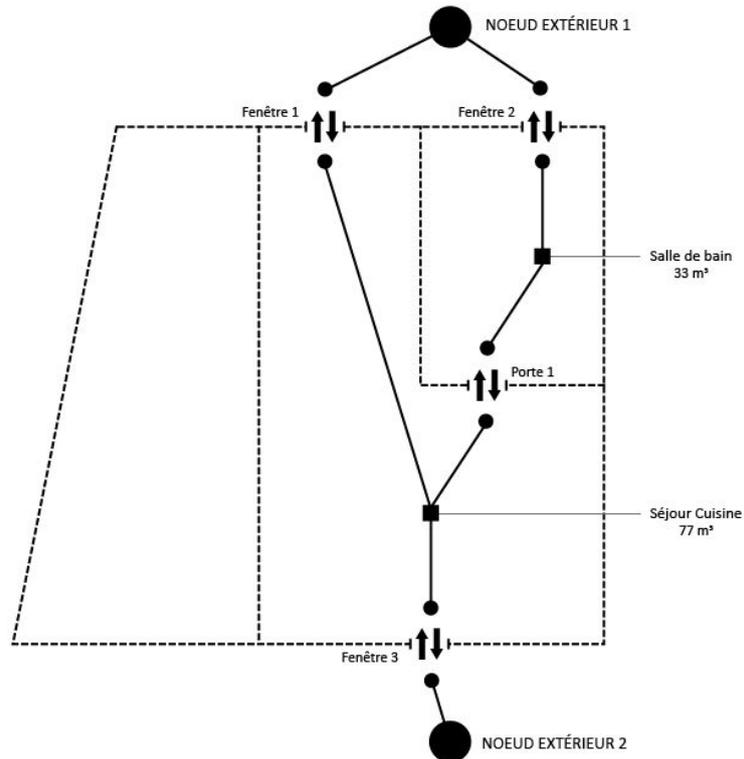
Initialement, le module aéraulique d'EnergyPlus donne la possibilité de contrôler le taux d'ouverture d'une fenêtre. Il faut alors préciser des coefficients de décharge (Chapitre 3.2.2) associés à des taux d'ouverture prédéfinis, quatre au maximum dont les taux de décharge pour une fenêtre totalement ouverte et une fenêtre totalement fermée. Ensuite, le module aéraulique interpole linéairement entre chacun des taux d'ouverture le coefficient de décharge associé à la surface d'ouverture de la fenêtre. Dans cette étude, la modélisation du taux d'ouverture variable des fenêtres tient compte du changement apporté par la subdivision en 9 sous-fenêtres de surface d'ouverture égale. Chacune des sous-fenêtres a un taux de décharge de 0,6. Similairement au scénario lié au taux d'occultation, pour le taux d'ouverture des fenêtres, 10 cas sont possibles :

- $x < 0,1 \Rightarrow$ les 9 sous-fenêtres sont fermées, le taux d'ouverture est de 0%,
- $0,1 \leq x < 0,2 \Rightarrow$ seule la sous-fenêtre du bas est ouverte, le taux d'ouverture est de 11,1%,
- ... ,
- $0,8 \leq x < 0,9 \Rightarrow$ les 8 sous-fenêtres en partant du haut sont ouvertes, seule la fenêtre haute est fermée, le taux d'ouverture est de 88,9%,
- $0,9 \leq x < 1 \Rightarrow$ les 9 sous-fenêtres sont ouvertes, le taux d'ouverture est de 100%.

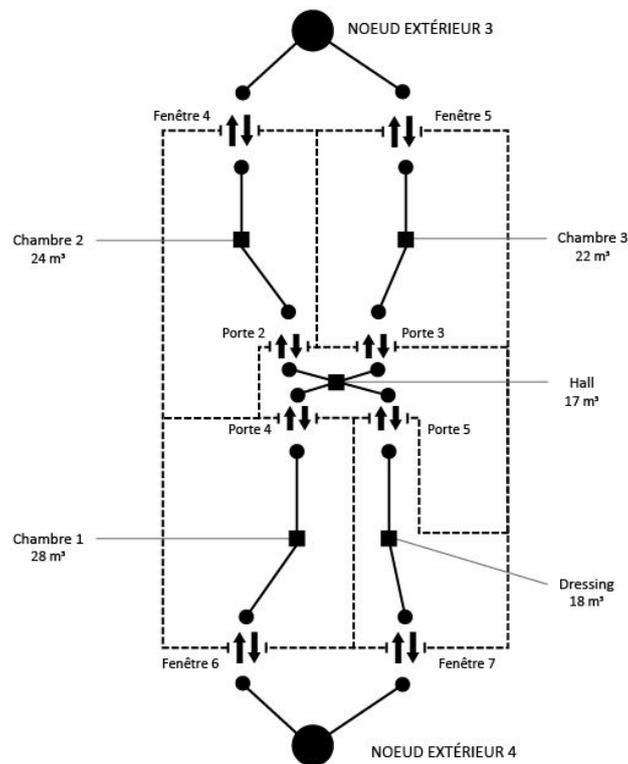
Les sous-fenêtres ayant une position identique possèdent le même scénario d'ouverture. À un moment donné de la journée, toutes les fenêtres du bâtiment sont ouvertes de façon identique. Ce scénario d'ouverture varie suivant les différents moments de la journée, à 7h, à 12h et à 20h. Durant les autres heures de la journée, toutes les fenêtres sont maintenues fermées. Les Figures 3.9a et 3.9b présentent les échanges aérauliques modélisés entre les zones du bâtiment. La circulation d'air entre les deux niveaux du bâtiment n'est pas permise par le modèle. La ventilation par tirage thermique pour des ouvertures de grandes hauteurs est privilégiée pour chacun des niveaux. Avec une simulation où les fenêtres manoeuvrables sont entièrement ouvertes le matin, le débit de pointe moyen dû à la ventilation naturelle, sur les mois de juillet et août, dans le séjour-cuisine, est de 10 *vol/h* et dans la plus grande des chambres à l'étage de 11 *vol/h*.

Une limitation de ce modèle concerne l'interaction entre le débit à travers une sous-fenêtre ouverte alors que le volet associé, lui, est fermé. Dans le module aéraulique, il est

3.3. Déroulement de la méthodologie sur une maison existante



(a) Échanges aérauliques par tirage thermique au rez-de-chaussée



(b) Échanges aérauliques par tirage thermique à l'étage

Figure 3.9 – Visualisation des échanges aérauliques modélisés. Les carrés représentent les volumes d'air associés à chaque zone et les points représentent les noeuds de calcul des pressions

supposé que le flux d'air à travers une ouverture de fenêtre n'est pas affecté par la présence d'un dispositif de protection solaire. Ainsi, l'analyse de sensibilité réalisée, en prenant comme sortie les résultats de simulation du modèle, ne pourra pas révéler la présence d'une interaction entre les actions relatives aux ouvertures de volets et celles relatives aux ouvertures de fenêtres puisque le modèle ne modélise pas ce phénomène. Les résultats de ces travaux de thèse ne sont pas altérés par cette limitation du modèle puisque la recherche d'éco-comportements est basée sur des résultats d'analyse de sensibilité réduits aux effets seuls de chaque action. Les interactions entre les actions pouvant se traduire en éco-comportement ne sont pas dans l'optique de cette étude.

Contrôle du débit de la ventilation mécanique

Le débit de ventilation mécanique étant une entrée du modèle, la variation de la valeur du débit de surventilation nocturne renseignée dans le modèle ne nécessite aucune modification supplémentaire du modèle. Le débit est contrôlé pour chaque zone, en volume par heure. Les heures de fonctionnement de la surventilation mécanique nocturne sont fixées par un scénario.

Contrôle de la puissance des équipements

Les apports de chaleur dus à l'utilisation d'équipements par les occupants sont modélisables à travers des scénarios de gains de chaleur internes par mètre carré. La possibilité est donnée dans EnergyPlus de diviser cette chaleur en quatre fractions différentes et donc de fixer la part de chaleur sensible à 0,5 (Chapitre 3.3.1). Trois d'entre elles sont des entrées du modèle, la part de chaleur latente ($f_{latente}$), la part de chaleur radiante ($f_{radiante}$) et la part de chaleur perdue (f_{perdue}). La part de chaleur convective ($f_{convective}$) est déduite des trois autres par l'équation 3.2. La réglementation ne donnant que des valeurs de chaleur sensible, dans cette étude, les parts de chaleur latente et perdue sont nulles.

$$f_{convective} = 1 - (f_{latente} + f_{radiante} + f_{perdue}) \quad (3.2)$$

Puissance associée à la présence des occupants

La présence des occupants est modélisée mais cette action ne fait pas partie des entrées qui varient dans l'analyse. Pourtant, un soin particulier doit être apporté à la modélisation de la chaleur dégagée par les occupants. Afin de tenir compte des gains internes dus au métabolisme des occupants, une puissance leur a été associée. Cette puissance est tirée de la réglementation thermique. En journée, le métabolisme associé est de 90 W pour un adulte. Le soir, dans les zones de nuit, il est de 63 W. La réglementation précise que cette chaleur sensible est émise pour 50% par échanges convectifs.

Synthèse des actions propagées dans le modèle

Les lois et les plages de variations des actions modélisées comme variables sont résumées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 – Récapitulatif des valeurs utilisées pour appliquer l'échantillonnage LHS

Actions	Distribution	Min.	Max.
1 - Ouverture des fenêtres le matin	Uniforme	0	1
2 - Ouverture des fenêtres le midi	Uniforme	0	1
3 - Ouverture des fenêtres le soir	Uniforme	0	1
4 - Ouverture des volets le matin	Uniforme	0	1
5 - Ouverture des volets le midi	Uniforme	0	1
6 - Ouverture des volets l'après-midi	Uniforme	0	1
7 - Ouverture des volets le soir	Uniforme	0	1
8 - Utilisation d'équipements le matin	Uniforme	2.3	6.9
9 - Utilisation d'équipements le midi	Uniforme	2.3	6.9
10 - Utilisation d'équipements le soir	Uniforme	2.3	6.9
11 - Fonctionnement d'équipements en mode veille	Uniforme	0.55	1.65
12 - Utilisation de la surventilation mécanique nocturne	Uniforme	90	150

3.3.3 Étude des combinaisons d'actions générées par l'échantillonnage LHS

Afin d'explorer au mieux les réponses thermiques possibles du bâtiment sous des combinaisons possibles des actions des habitants, 1000 combinaisons d'actions sont générées durant la phase d'échantillonnage. D'autre part, ce nombre d'évaluations devra permettre de faire converger l'estimation des indices de sensibilité par la méthode RBD-FAST.

Pour mieux comprendre comment ces combinaisons sont créées et concevoir les comportements ainsi générés, il faut reprendre le fonctionnement de l'échantillonnage LHS.

Avec l'approche LHS, la loi de distribution cumulative de chaque variable d'entrée étudiée est divisée en N intervalles équiprobables. Dans chacun des intervalles équiprobables établis, une valeur est sélectionnée de manière aléatoire. La Figure 3.10a représente la densité de probabilité associée à une ouverture de volets et la Figure 3.10b représente le partitionnement en 10 sous-espaces de probabilité égale de cette variable.

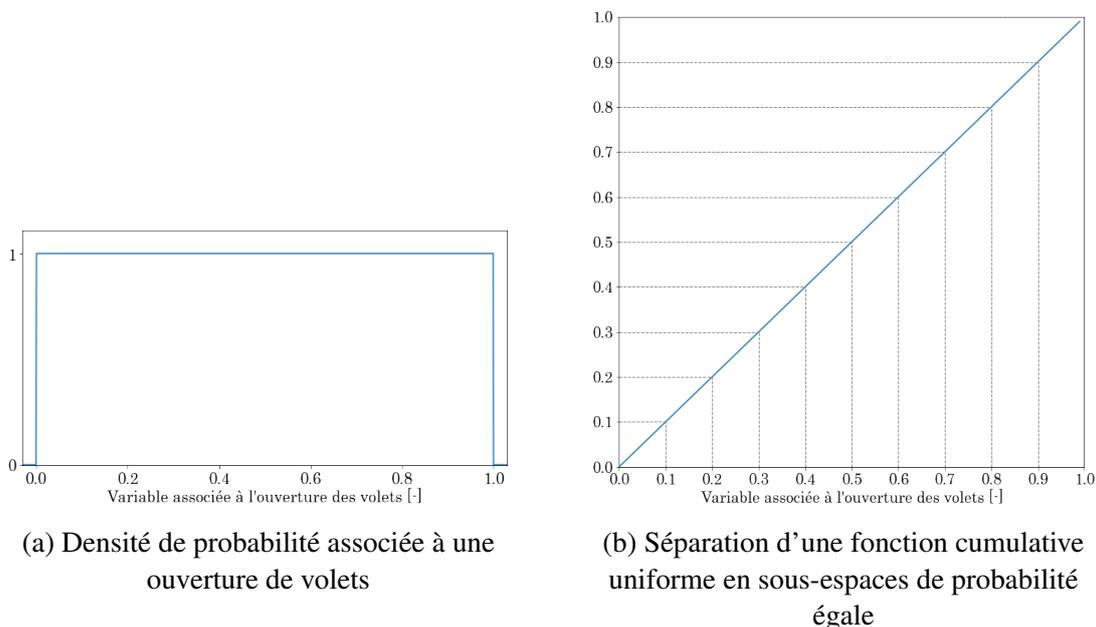


Figure 3.10 – Illustration sur une action de l'étude du partitionnement de la loi de distribution cumulative associée avec la méthode LHS

Ce processus est répété pour chaque variable de l'analyse et tous ces échantillonnages unidimensionnels sont choisis aléatoirement de façon indépendante puis combinés pour former un plan d'expériences.

Avec une loi de distribution uniforme entre 0 et 1, la probabilité pour que l'évènement

« la variable associée à l'ouverture des volets est comprise entre 0 et 0,1 » se réalise est alors de 0,10. L'échantillonnage des variables associées aux ouvertures des volets entre les différents moments de la journée étant considéré comme indépendant, la probabilité pour que l'évènement « la variable associée à l'ouverture des volets le matin est comprise entre 0 et 0,1 » et « la variable associée à l'ouverture des volets le midi est comprise entre 0 et 0,1 » se réalise est alors égale à $0,10 \times 0,10$. D'après la formule de calcul de l'espérance 3.3 et pour 1000 échantillons, le nombre moyen d'échantillons répondant à ces deux critères est de 10.

$$E(X) = \sum_{i=1}^n x_i \times P(X = x_i) \quad (3.3)$$

Sur la Figure 3.11, les différentes combinaisons obtenues entre ces deux actions sont positionnées. Le nombre d'échantillons obtenu pour chaque sous-espace délimité a été annoté. Par exemple, dans cette étude, 14 échantillons correspondent à l'évènement précédemment énoncé.

Avec les méthodes d'échantillonnage basées sur un processus de Monte Carlo, il est possible grâce aux choix de plages de variations et des lois de distribution de favoriser la représentativité de certains comportements. Dans notre étude, les comportements sont laissés libres pour permettre de juger de manière exhaustive l'impact de la variation de l'intensité d'une action sur la température intérieure comme discuté au Chapitre 3.3.1.

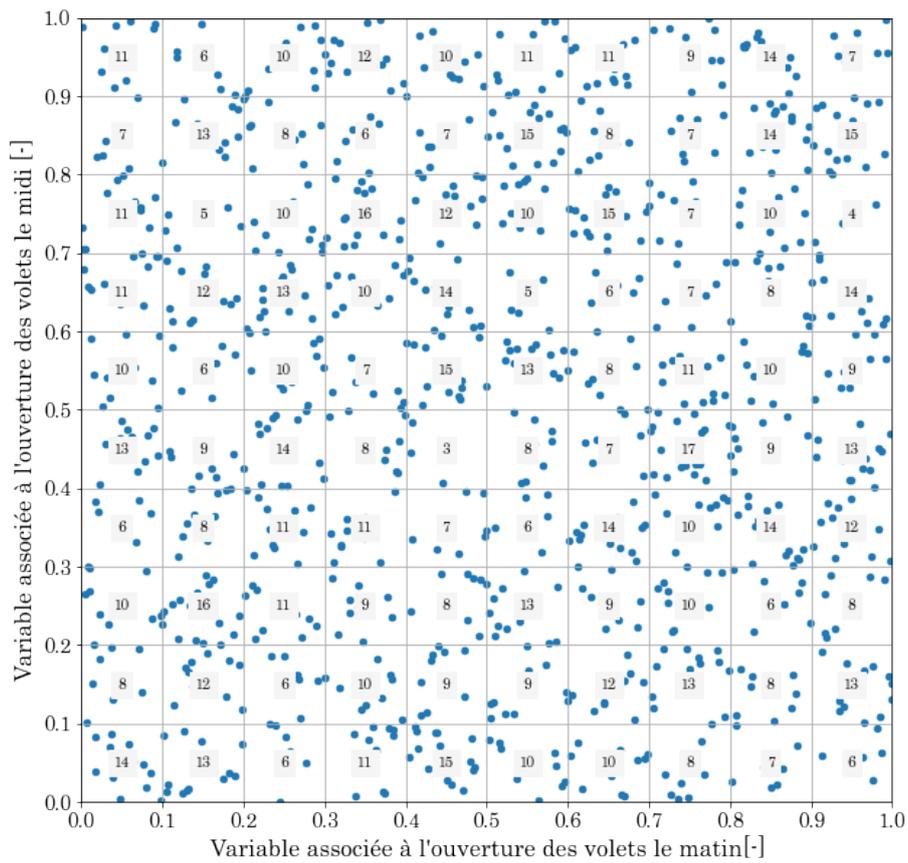


Figure 3.11 – Représentation de l'ensemble des combinaisons associées à l'ouverture des volets le matin et l'ouverture des volets le midi obtenues par l'étape d'échantillonnage. Les valeurs indiquées correspondent au nombre de combinaisons se trouvant dans les différents sous-espaces délimités

3.3.4 Mise en évidence des risques de surchauffe et du potentiel d'amélioration

Après la phase d'échantillonnage, 1000 combinaisons d'actions sont générées. La propagation de ces 1000 échantillons dans le modèle permet d'obtenir au pas de temps horaire la valeur de la température opérative calculée pour chaque zone du bâtiment. Il est alors possible d'étudier la dispersion des valeurs de température liée à la variation des combinaisons d'actions entre chaque simulation.

Dans le cadre de ce travail, une routine Python a été créée afin d'automatiser la création de fichiers .idf dont les entrées sont modifiées en fonction des valeurs de chaque échantillon grâce à la bibliothèque de fonctions Eppy¹. Les simulations étant indépendantes, une bibliothèque de fonctions comme Energyplus_wrapper développée au laboratoire LOCIE² peut être utilisée pour paralléliser les calculs et extraire automatiquement les sorties de chaque simulation.

Communément, l'étude de l'espace de sortie d'un modèle suite à la propagation d'échantillons issus d'un plan d'expériences provenant de méthodes basées sur des lois de distribution est appelé « analyse d'incertitude ». L'incertitude de la sortie provient alors de l'incertitude des entrées. L'incertitude des entrées, quant à elle, peut être due entre autres à un manque de connaissance ou d'une variabilité intrinsèque des mesures. Dans le cadre de ces travaux de thèse, l'expression « analyse de la variabilité » peut être préférée puisque les entrées ne sont pas à proprement parler « incertaines ». La variabilité des actions des occupants propagées dans le modèle ne vient pas d'un manque de connaissance ou d'une erreur de mesure sur leur valeur mais du fait que les occupants soient libres de leurs actions.

Choix de la période d'étude

À titre d'exemple, pour illustrer la méthodologie, l'interprétation des résultats se concentre sur la zone séjour-cuisine, zone exposée sud et présentant la plus grande surface au sol. Sur la Figure 3.12, les 1000 courbes de température opérative résultantes ont été tracées sur la période allant de début juin à fin août 2018. Sur la période allant du 25 juillet au 9 août, les températures intérieures calculées sont très élevées. La suite du déroulement de la méthodologie se fera donc sur cette période pour laquelle la recherche d'éco-comportements est pertinente.

1. <https://eppy.readthedocs.io/en/latest/index.html>

2. <https://github.com/locie>

De plus, cette période correspond, à un jour près, à l'épisode de vague de chaleur enregistrée en France durant l'année 2018. Le décalage d'une journée avec les dates mentionnées par [MétéoFrance \(2014\)](#) peut s'expliquer, d'une part, par le fait que les événements caniculaires ne sont pas homogènes sur toute la France, et d'autre part, par l'inertie des parois du bâtiment qui retarde à la fois la montée et la descente en température de celui-ci au début et à la fin de la vague de chaleur.



Figure 3.12 – Évolution de la température opérative pour les 1000 simulations sur la saison estivale et mise en évidence de la période d'étude (en orange)

Choix de l'indicateur de confort d'été

Au Chapitre 1 de ce manuscrit, différents travaux et normes pour évaluer le confort ont été présentés. Afin d'obtenir un indicateur simple du confort d'été et d'étudier les périodes à risque de surchauffe dans les différentes zones du bâtiment, on considère que l'inconfort chaud est atteint lorsque la température opérative intérieure d'une zone dépasse 28°C afin de garder un indicateur temporel simple de la dynamique de la réponse du bâtiment. En effet, un indicateur de confort scalaire donnant une information agrégée comme le nombre de degrés-heure au-dessus d'une température limite n'aurait pas permis une dimension temporelle à l'étude.

La norme NF 15251 définit une température de confort journalière ([NF EN 15251 \(2007\)](#)). Afin de travailler avec une unique température de confort sur la période d'étude, la valeur maximale de température de confort sur cette période (28°C) a été prise comme valeur de référence. Cette valeur a été calculée à partir des équations proposées par la norme. La valeur exacte, 27.6°C, est calculée par l'équation 3.4 et dépend de la température extérieure en moyenne glissante T_{RM7} sur la période allant du 25 juillet au 09 août. Cette température se calcule grâce à l'équation 3.5 à partir des températures extérieures

moyennes mesurées sur les sept jours précédents ($T_{ext-1}, \dots, T_{ext-7}$). En représentant une température seuil de confort chaud à 28°C sur la Figure 3.12, cette période présente sur la totalité de sa durée un risque d'inconfort dépendant des actions des occupants.

$$T_C = 0.33 \cdot T_{RM7} + 18.8 \quad (3.4)$$

$$T_{RM7} = \frac{T_{ext-1} + 0.8 \cdot T_{ext-2} + 0.6 \cdot T_{ext-3} + 0.5 \cdot T_{ext-4} + 0.4 \cdot T_{ext-5} + 0.3 \cdot T_{ext-6} + 0.2 \cdot T_{ext-7}}{3.8} \quad (3.5)$$

Analyse de la variabilité de la température dans la zone séjour-cuisine

À chaque pas de temps horaire, le profil de distribution des températures opératives peut être tracé. La valeur médiane des températures, l'intervalle de confiance à 50% dans lequel se trouve, pour chaque heure, 500 des 1000 valeurs de température calculées ainsi que l'intervalle de confiance à 95%, contenant 950 des 1000 valeurs de température, ont été déterminés. Ces courbes sont représentées sur la Figure 3.13. La bande orange correspond à la courbe enveloppe tracée à partir des valeurs minimales et maximales de la température calculées pour chaque pas de temps et contient donc l'ensemble des valeurs de température calculées à chaque pas de temps.

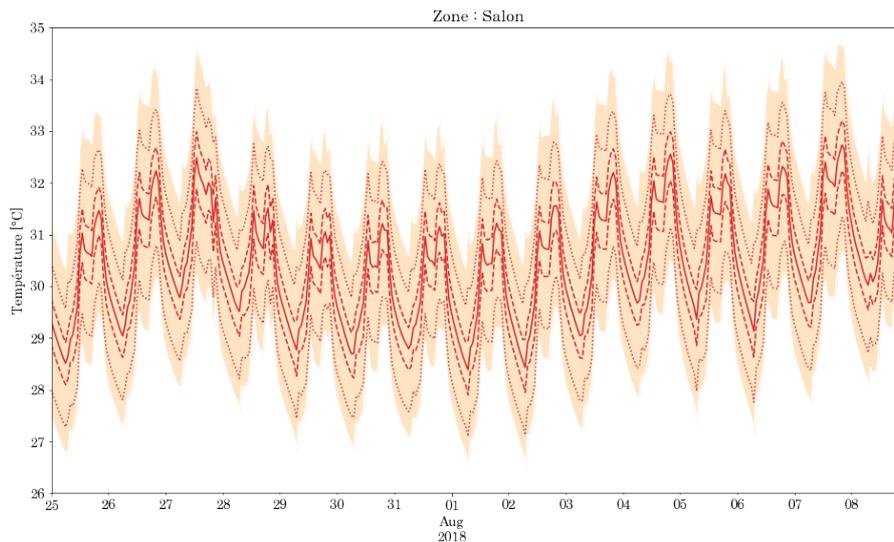


Figure 3.13 – Évolution de la médiane (trait plein), de l'intervalle de confiance à 50% (traits discontinus), de l'intervalle de confiance à 95% (traits pointillés) et de la courbe enveloppe min-max (en orange) de la température opérative dans le salon sur la période à risque

La tendance générale des profils de température observés peut être expliquée par les sollicitations extérieures (la météo) dont la dynamique est le moteur de l'évolution des températures à l'intérieur du bâtiment. Les profils de température d'air extérieure et de rayonnement solaire direct enregistrés à cette période ont été tracés sur la Figure 3.6.

Les actions étant les seules entrées du modèle modifiées d'une simulation à l'autre, la variabilité entre les 1000 températures obtenues est alors due uniquement aux actions des habitants. L'amplitude entre les différentes valeurs de température obtenues met en évidence l'existence d'une marge de manœuvre possible sur la température induite par le comportement des habitants.

De plus, il faut rappeler que les 1000 combinaisons obtenues par échantillonnage contiennent statistiquement peu de combinaisons pouvant correspondre à des scénarios de comportements extrêmes comme une combinaison pour laquelle tous les volets seraient ouverts (espérance inférieure à 1). Même en absence de ce type de combinaisons, des dispersions fortes entre les valeurs de température sont obtenues, au minimum 3.5°C entre les valeurs minimales et maximales de température.

Afin de mieux observer la variabilité, l'écart-type est utilisé car il s'agit d'un indicateur de variabilité de même unité que la variable d'observation contrairement à la variance. Ces deux variables sont fortement corrélées, l'écart-type étant la racine carrée de la variance. Le tracé de l'évolution de l'écart-type entre les 1000 valeurs de température obtenues à chaque pas de temps horaire permet d'observer l'influence des actions des occupants sur la dispersion des résultats. Sur la Figure 3.14, l'écart-type des températures opératives a été tracé pour les trois premiers jours de la période à risque. Cet écart-type est toujours non nul, il y a donc toujours une marge de manœuvre possible. De plus, cet indicateur est dépendant du temps, on observe qu'à certains instants, la dispersion des valeurs de température est plus forte. Une étude temporelle est donc pertinente pour évaluer au cours du temps les influences respectives de chaque action sur la dispersion des valeurs de température opérative retrouvées.

3.3. Déroulement de la méthodologie sur une maison existante

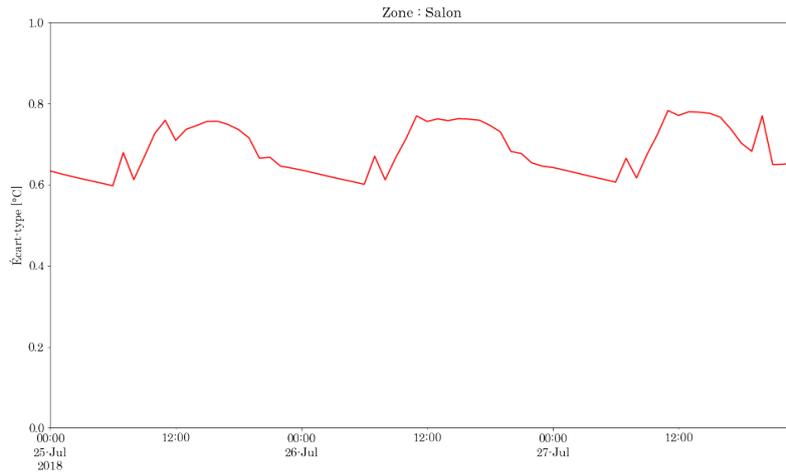


Figure 3.14 – Évolution de l'écart-type des températures obtenues sur les 3 premiers jours de la période à risque

Afin de présenter plus en détail les enjeux liés aux actions des habitants vis-à-vis du confort d'été sur la période d'étude, un effort particulier a été fait sur la représentation graphique de l'ensemble des résultats de simulation. Le but est de rapidement identifier le risque d'inconfort d'une part et la marge de manœuvre possible d'autre part induits par le comportements des occupants.

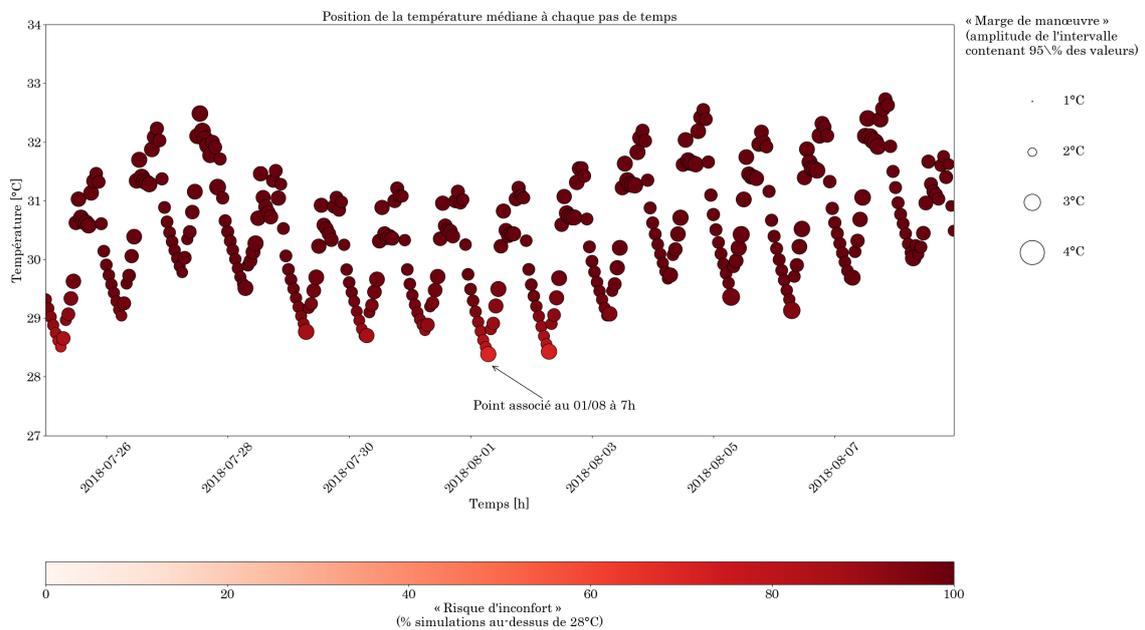


Figure 3.15 – Étude des risques et de la marge de manœuvre possible sur la période du 25/07 au 09/08

Cette représentation est utilisée en Figure 3.15 et elle se base sur la position de la température médiane des 1000 valeurs de température obtenues à chaque pas de temps. Ensuite le risque d'inconfort traduit par le pourcentage de valeurs de température parmi

les 1000 au-dessus de 28°C est nuancé suivant une échelle de couleur. Puis, « la marge de manœuvre » ou l'intervalle dans lequel se trouvent 95% des 1000 valeurs de température est une dimension ajoutée grâce à la taille de chacun des éléments placés. Ainsi, sur la période d'étude, le risque et la marge de manœuvre possible sont fortement variables au cours du temps. Un risque d'inconfort élevé correspond au fait que la plupart des combinaisons entraînent de l'inconfort. Une marge de manœuvre importante caractérise les instants où le bâti est très sensible aux actions des occupants.

Par exemple, on peut lire sur cette Figure que le 01 août à 7h, le risque d'inconfort est d'environ 60% alors que la marge de manœuvre associée est entre 2 et 3°C.

Dans le cas d'étude présenté, on identifie peu de périodes où le risque d'inconfort est inférieur à 60% c'est à dire où moins de 60% des combinaisons testées entraînent de l'inconfort. La plupart du temps, le risque d'inconfort est élevé. Enfin, même si le risque d'inconfort est élevé, il apparaît que la marge de manœuvre est toujours supérieure à 2°C. Ainsi, durant ces heures, il est peu probable que des actions permettent de passer en dessous de la limite de 28°C. Pourtant, une différence de 2°C représente soit un risque d'intensité d'inconfort supplémentaire ou inversement d'un gain de confort non négligeable en période de surchauffe.

3.3.5 Étude des indices de sensibilité

Dans le but d'identifier parmi les 12 actions lesquelles influent sur la dispersion des températures obtenue précédemment, la sensibilité de la température opérative dans la zone séjour-cuisine aux actions des occupants a été évaluée. La méthode RBD-FAST a été utilisée pour calculer, à partir des résultats de la propagation du plan d'expériences dans le modèle, les indices de sensibilité du premier ordre de chaque action sur la température opérative à chaque pas de temps horaire. Les indices de sensibilité issus de cette méthode reflètent la part de la variabilité de la température induite par la variabilité d'une action prise seule. Ces indices évoluent donc entre 0 et 1. La Figure 3.17 présente l'évolution temporelle de ces indices de sensibilité $S_i(t)$ obtenus pour chacune des actions des occupants sur la période d'étude. Pour obtenir ces indices de sensibilité temporels, l'analyse de sensibilité est lancée autant de fois que le nombre de pas de temps compris dans l'étude soit $24 \times 15 = 360$ fois sur la période d'étude.

Interactions des actions

Sur la Figure 3.16, l'évolution des indices de sensibilité cumulés sur la période d'étude a été tracée. Théoriquement, si la somme des indices du premier ordre est proche de 1, alors les effets du premier ordre des différentes actions expliquent la variabilité de la tem-

pérature opérative. Une valeur éloignée de 1 indique qu'une part de la variabilité de la température est due à des interactions entre les valeurs prises par différentes actions et leur influence sur la température opérative résultante. Au vu du profil obtenu de la Figure 3.16, l'influence des interactions sur la valeur prise par la température opérative est faible, la mise en place d'une démarche spécifique pour rechercher les interactions possibles n'est donc pas nécessaire.

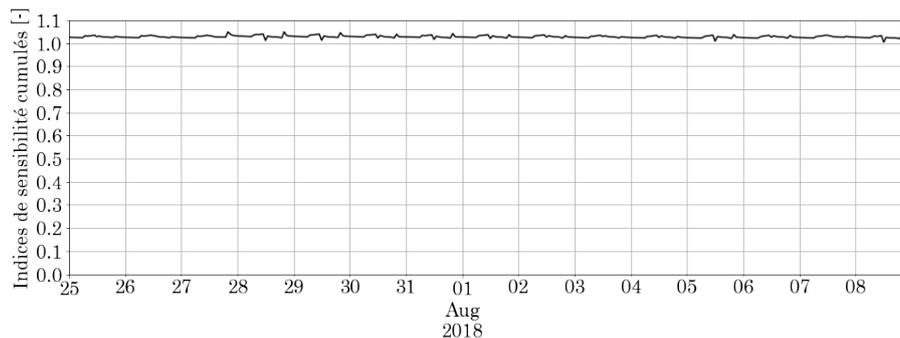


Figure 3.16 – Évolution des indices cumulés de sensibilité du premier ordre

En théorie, la méthode RBD-FAST fournit des indices de sensibilité positifs, compris entre 0 et 1. Cependant, comme précisé au Chapitre 2.2.1, le biais de l'estimateur et la correction de ce terme peuvent mener à des indices de sensibilité négatifs pour les influences les plus faibles. Ces valeurs négatives permettent de déterminer le seuil de l'incertitude sur l'estimation des indices qui est de 1.1%. En dessous de 1.1%, l'influence calculée d'une action ne peut être considérée que comme un bruit dans le calcul des indices.

Indices de sensibilité du premier ordre

Sur la Figure 3.17, l'évolution de l'indice du premier ordre associé à chaque action a été tracée sur la période allant du 25 juillet au 9 août au pas de temps horaire. D'après l'évolution des indices présentés, aucune action n'explique à elle seule la variabilité de la température opérative dans le bâtiment sur l'ensemble des heures qui composent la période d'étude. À la place, différents scénarios d'influence sont observables sur ces tracés.

On rappelle qu'a priori toutes les actions modélisées ont une influence sur la température opérative. Par exemple, les équipements fonctionnant à une puissance donnée dégagent de la chaleur et donc influent sur la température opérative. Ce que les indices de sensibilité reflètent n'est pas l'influence sur la température des équipements fonctionnant à une puissance donnée mais l'influence du choix de l'occupant de cette puissance de fonctionnement des équipements (dans des bornes prédéfinies). Ainsi, en prenant un autre exemple, on parle alors de l'influence de l'action liée ou relative à l'ouverture des volets le matin ou de l'influence du taux d'ouverture des volets le matin. Par abus de langage,

dans ce manuscrit, l'influence de l'ouverture des volets le matin fait également référence à l'action des occupants.

Les pics d'influence sont le phénomène le plus facilement observable. Il se traduit par une valeur de l'indice de sensibilité d'une action qui augmente et diminue rapidement. D'après les courbes, ce phénomène intervient principalement lorsqu'une action débute. Les pics d'influence sont les plus marqués pour les actions relatives au taux d'ouverture des fenêtres. En effet, suivant l'écart des températures entre l'air intérieur et l'air extérieur, les débits de renouvellement d'air sont importants, entraînant une augmentation des échanges par convection avec les parois internes du bâtiment et une modification de la température d'air de la pièce considérée. La température opérative de la pièce est donc influencée par ces deux phénomènes. Dès que les fenêtres sont à nouveau fermées, les indices de sensibilité associés aux ouvertures de fenêtres diminuent progressivement après l'arrêt de l'action.

Lorsque l'influence d'une action n'apparaît pas sous forme de pics d'influence, elle se fait ressentir progressivement sur la température opérative au cours du temps. Il s'agit alors d'observer des échanges thermiques qui montent en intensité durant la réalisation de l'action. Par exemple, au cours de la nuit, l'influence de la ventilation mécanique ne cesse d'augmenter et cela pourrait être expliqué par la diminution de la température extérieure durant la nuit rendant le rafraîchissement de plus en plus performant et donc plus influent sur la température.

D'autre part, et plus généralement, plus la réalisation d'une action et le moment d'observation de son influence sont éloignés dans le temps, plus l'influence de cette action baisse. Les indices de sensibilité ne reflétant qu'une influence relative d'une action vis à vis des autres sur la température, l'augmentation progressive d'un indice peut être due à la diminution d'indices associés à d'autres actions. Malgré le fait que la ventilation mécanique nocturne soit la seule action encore en cours, son indice de sensibilité ne dépasse pas les 0,2. En effet, les indices atteints alors par les autres actions ont diminué progressivement sans pour autant être nuls.

L'évolution de la courbe de l'indice de sensibilité associé au taux d'ouverture des volets le matin montre des sursauts de baisse d'influence. Ce phénomène peut très bien s'expliquer par la présence, aux instants précis où les indices de sensibilité baissent exagérément, d'une action qui domine la réponse thermique, seulement sur ces instants, comme les ouvertures de fenêtres. La baisse de sensibilité est alors la conséquence d'un calcul relatif de cette influence.

3.3. Déroulement de la méthodologie sur une maison existante

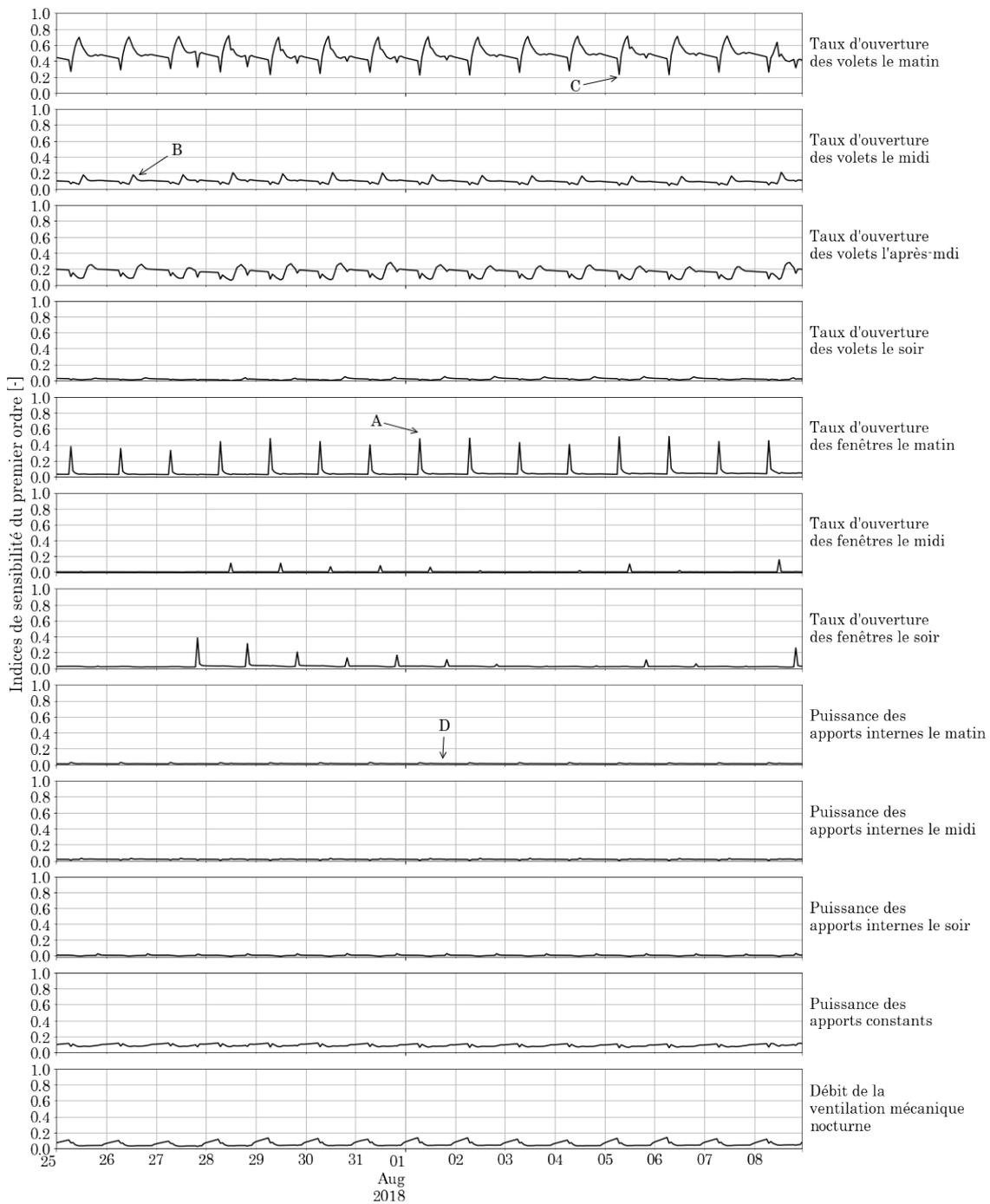


Figure 3.17 – Évolution des indices de sensibilité du premier ordre de chaque action.

Différents scénarios d'influence sont observables :

- (A) des pics d'influence
- (B) des phénomènes d'augmentation et d'atténuation progressives de l'influence
- (C) des périodes présentant des discontinuités d'influence
- et (D) d'absence totale d'influence

Il est également possible d'affirmer que parmi ces actions, et dans les plages de variation des actions sélectionnées, la gestion des volets en soirée n'a que très peu d'influence sur la température opérative sur une journée.

Cependant, lorsque l'on prend en compte la dimension temporelle, il est difficile de conclure quant à l'influence d'une action uniquement à l'aide des indices de sensibilité précédemment présentés puisque la variance sur laquelle repose le calcul de ces indices évolue au cours du temps comme le montre l'évolution de l'écart-type (Figure 3.14). En effet, les indices de sensibilité du premier ordre sont des indices normalisés ramené sur la variance totale à chaque pas de temps ce qui peut biaiser l'interprétation de l'influence d'une action. Ainsi, travailler avec des valeurs de sensibilité absolues plutôt que relatives est préférable. Les valeurs de variances partielles sont alors utilisées. Le Chapitre 3.3.6 introduit ces valeurs.

3.3.6 Étude des variances partielles

L'étude des variances partielles peut être préférée à l'étude des indices de sensibilité pour conclure sur l'influence de chacune des actions. En effet, les indices de sensibilité du premier ordre reflètent la part de la variabilité entre les 1000 valeurs de température opérative obtenues à chaque pas de temps induites par chacune des actions. L'étude de la variabilité au cours du temps réalisée au Chapitre 3.3.4 a permis de montrer que la variance totale de la température est différente entre chaque pas de temps. Pour déterminer à chaque pas de temps quelle action est influente et avec quelle intensité, il est alors intéressant de travailler avec des indices traduisant l'influence absolue plutôt que l'influence relative de chacune des actions. Aux indices de sensibilité classiques peuvent alors être préférées les valeurs de variances partielles, issues de la décomposition de Sobol (Chapitre 2.2.1) et dont les précédents indices sont déduits par la relation 3.6. Avec S_i , l'indice de sensibilité du premier ordre de l'action i , V_i la variance partielle associée à l'action i seule et V la variance totale. Il suffit de ne pas normaliser les indices pour obtenir cette variance partielle.

$$S_i = \frac{V_i}{V} \quad (3.6)$$

Comme pour les indices du premier ordre (Figure 3.17), les variances partielles associées à chaque action ont été tracées séparément sur la période d'étude sur la Figure 3.18. Les variances partielles représentant la part absolue de la variance totale expliquée par une action seule, l'unité des variances partielles est donc, comme la variance, le degré Celsius élevé au carré.

Critères d'influence

Afin de ne visualiser que des influences significatives, deux critères ont été appliqués à partir des indices de sensibilité classiques :

- la variance totale V calculée au pas de temps t doit être supérieure à $0,06^{\circ}C^2$ ce qui correspond à un écart relatif minimal σ de $0,25^{\circ}C$
- et l'indice de sensibilité du premier ordre associé à une action doit être supérieur à 5%.

Variances partielles calculées

D'après les profils de variances partielles tracés sur la Figure 3.18, l'ouverture des volets le matin est l'action qui induit le plus de variabilité sur la température opérative dans le séjour-cuisine en comparaison avec les valeurs maximales de variances partielles associées aux autres actions. La deuxième action la plus influente est l'ouverture des fenêtres le matin mais l'impact de cette action, bien qu'important, n'est que de courte durée et intervient principalement au moment de la réalisation de l'action.

En prenant l'exemple de l'ouverture des volets le matin, la variance partielle associée étant non nulle après son arrêt à 12h, cela signifie que son influence persiste sur la réponse thermique du bâtiment tout au long de la journée. La nuit, la température opérative au sein du séjour-cuisine est alors en partie induite par cette action qui a eu lieu plusieurs heures auparavant. Une fois encore, l'approche temporelle paraît nécessaire pour mieux appréhender le comportement du bâtiment.

Les variances partielles associées à l'ouverture des volets le soir, la puissance des apports internes le matin, le midi et le soir n'ont pas été tracées car les valeurs de ces variances partielles sont toutes nulles sur l'ensemble de la période après application des critères d'influence.

Une étape indispensable pour pouvoir utiliser ces résultats est de vérifier que la taille de l'échantillonnage est suffisante pour faire converger les résultats de l'analyse de sensibilité desquels sont tirés les profils de variances partielles.

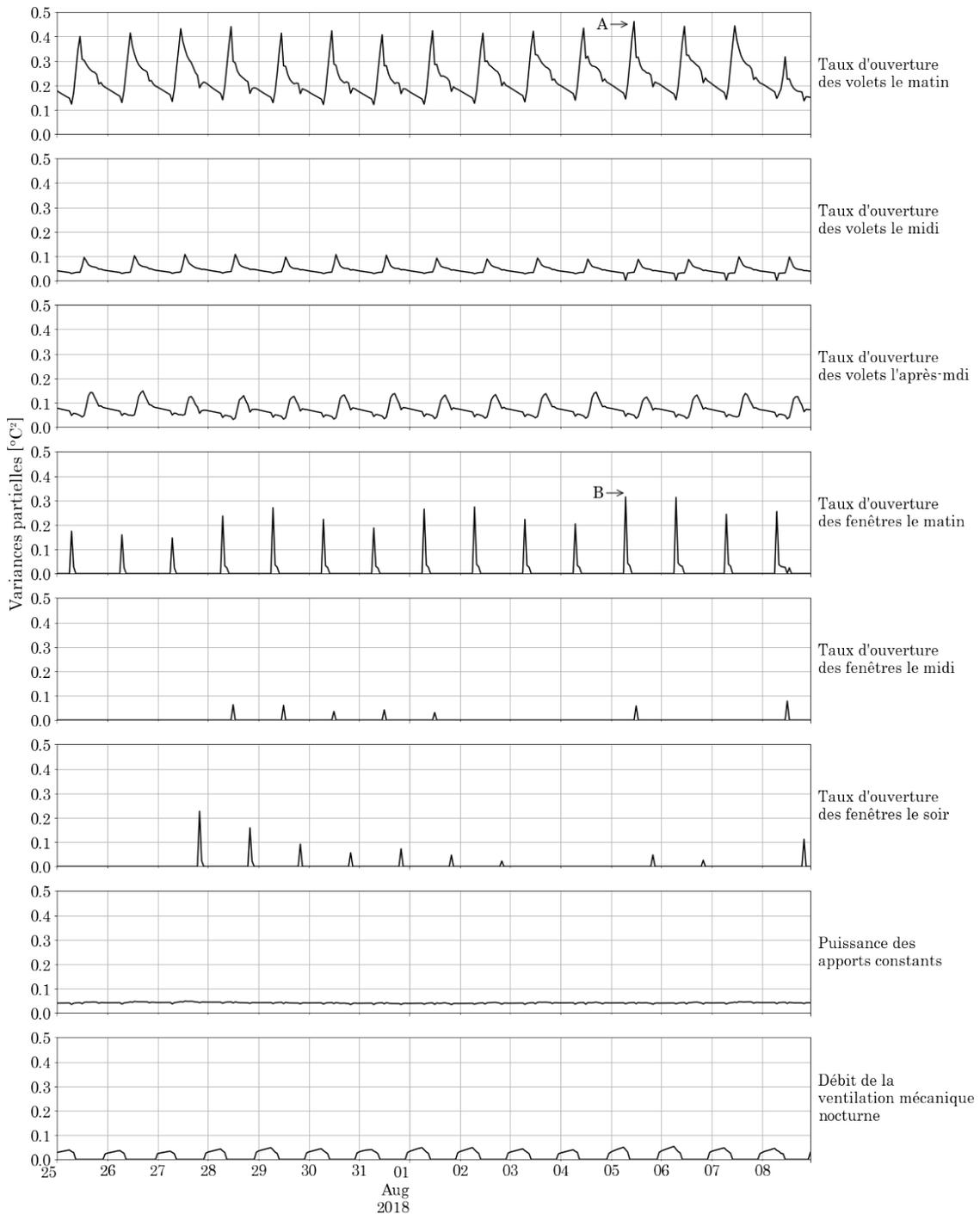


Figure 3.18 – Évolution des variances partielles associées aux actions influentes.

L'intensité maximale des variances partielles est observable :

- (A) variance partielle maximale associée à l'ouverture des volets le matin
- (B) variance partielle maximale associée à l'ouverture des fenêtres le matin

3.3.7 Convergence des résultats

Les études de la convergence des résultats de variance et de sensibilité doivent être réalisées afin de s'assurer que le nombre de simulations (1000) est suffisant pour obtenir une bonne approximation des variances partielles associées à chaque action. La vérification de la convergence des résultats a été faite pour 3 niveaux de sensibilité :

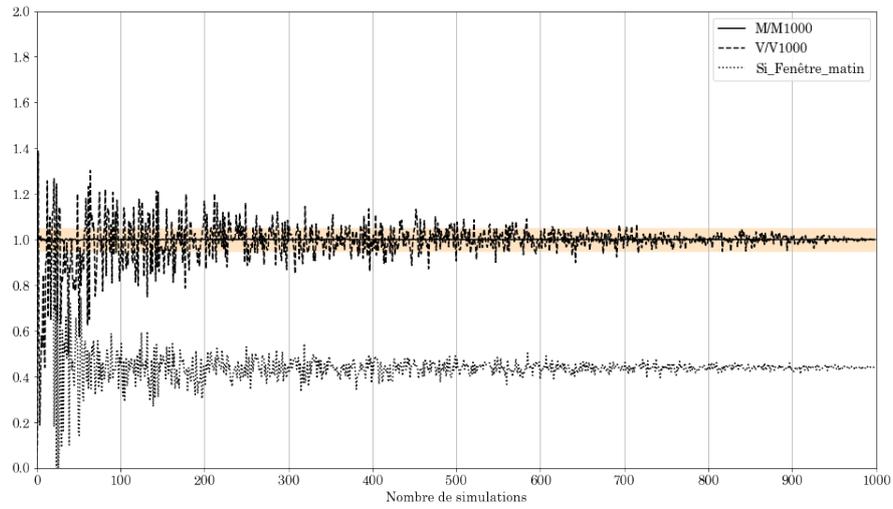
- pour un indice de sensibilité élevé ($> 40\%$)
- pour un indice de sensibilité moyen ($\approx 30\%$)
- pour un indice de sensibilité faible ($\approx 10\%$)

Arbitrairement, les actions et l'heure de vérification correspondant aux 3 niveaux présentés ci-dessus sont :

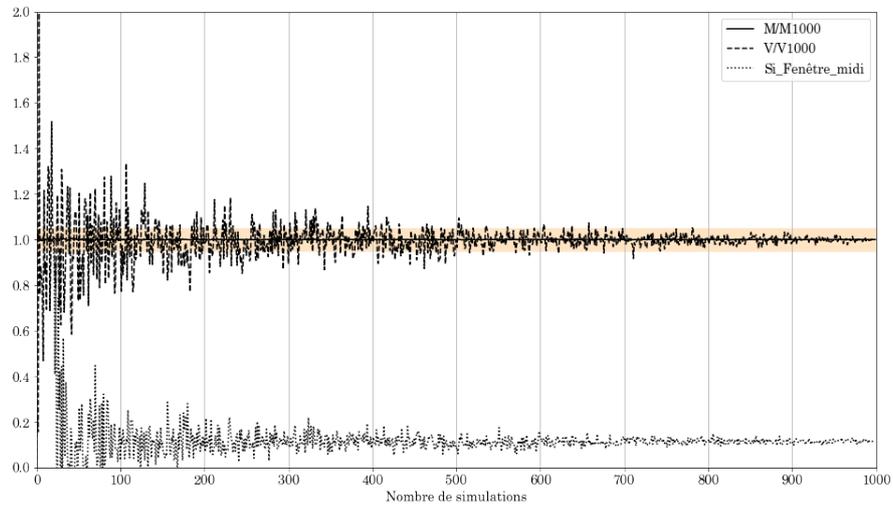
- l'ouverture des fenêtres le matin, le 28 juillet à 7h
- l'ouverture des fenêtres le midi, le 28 juillet à 12h
- l'ouverture des fenêtres le soir, le 28 juillet à 20h

Pour chaque cas, la convergence de la température opérative moyenne et de la variance ont été vérifiées. Les résultats présentés sur les Figures 3.19a, 3.19b, 3.19c montrent que la mesure de la dispersion des 1000 valeurs de température opérative est dépendante de l'échantillonnage, bien plus que la moyenne. Sur ces graphiques, la valeur normalisée de la température moyenne et de la variance totale obtenues en fonction du nombre de simulations a été tracée. L'intervalle de confiance à $\pm 5\%$ autour de la moyenne et de la variance normalisées a également été tracé. La variance totale converge avec 800 simulations pour être dans l'intervalle de confiance alors qu'une dizaine de simulations suffisent pour la moyenne grâce à l'emploi de l'approche LHS. Sur le même graphique, la courbe de convergence de l'indice de sensibilité du premier ordre de l'action étudiée est également tracée sans unité (non normalisé).

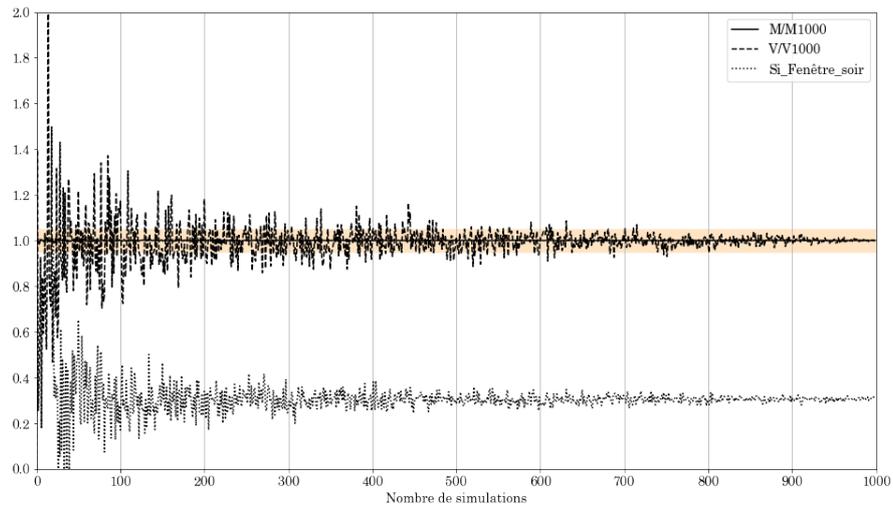
Les valeurs des indices et des variances totales convergent donc bien avec un plan d'expérience de taille 1000.



(a) Influence de l'ouverture des fenêtres le matin, le 28 juillet à 7h



(b) Influence de l'ouverture des fenêtres le midi, le 28 juillet à 12h



(c) Influence de l'ouverture des fenêtres le soir, le 28 juillet à 20h

Figure 3.19 – Courbe de convergence de la moyenne et de la variance de la température opérative à trois instants différents et intervalle de confiance à $\pm 5\%$ associé ainsi que la convergence de l'indice de sensibilité associé à l'ouverture des fenêtres

3.3.8 Introduction des variances partielles signées

« Sens » de l'impact

Les indices de sensibilité et les variances partielles calculées jusqu'à présent ne donnent pas d'information sur le sens de l'évolution de la température opérative en fonction de l'évolution des actions. Il est pourtant nécessaire d'évaluer le sens de l'impact d'une action sur l'ambiance thermique intérieure pour distinguer les actions qui tendent à la faire baisser pour améliorer le confort thermique estival de celles qui tendent à la faire augmenter et qui amplifient donc l'inconfort. Pour ce faire, la démarche est d'associer un coefficient « +1 » ou « -1 » propre à chaque pas de temps et pour chaque variance partielle. Calculer ce coefficient à chaque pas de temps permet de considérer qu'une même action peut avoir, à des pas de temps différents, des impacts opposés sur la température.

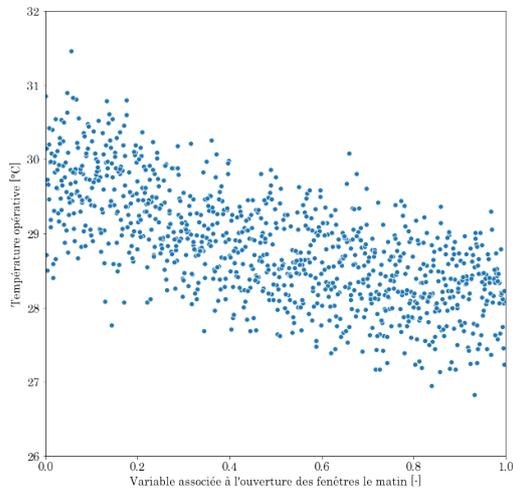
De plus, physiquement, on peut considérer que sur les plages de variation des actions sélectionnées, l'augmentation de l'intensité d'une action a un effet monotone sur la température. En effet, en absence de phénomène d'interaction des actions sur la température, cette hypothèse peut être faite. L'augmentation du taux d'ouverture des volets, à tous les moments de la journée, entraîne une augmentation du rayonnement solaire entrant. Cependant, l'ouverture des volets enlève une partie de la résistance thermique additionnelle s'opposant aux déperditions thermiques des vitrages. En période de fortes chaleurs, ces déperditions, aux heures d'ouvertures des volets de l'étude sont négligées, la température extérieure étant la plupart du temps supérieure à la température intérieure sur les périodes d'ouverture. Le pas de temps de calcul de la simulation étant de 10 minutes et les actions d'ouverture de fenêtres étant courtes (10 minutes), cette hypothèse est pertinente puisque les différences de pression de part et d'autres des ouvertures ne sont évaluées qu'une seule fois sur la période d'ouverture. La surventilation nocturne ne fonctionnant qu'à des périodes propices au rafraîchissement, l'hypothèse de monotonie est également pertinente tout comme pour les gains internes de chaleur associés aux équipements.

Le coefficient « +1 » ou « -1 » a été calculé à partir du signe du coefficient de Spearman calculé pour chaque pas de temps et pour chaque couple de variables (action de l'occupant, température opérative). Le coefficient de Spearman est un coefficient de corrélation basé sur les rangs qui vise à évaluer des relations monotones. Ce coefficient a été présenté au Chapitre 2.2.1.

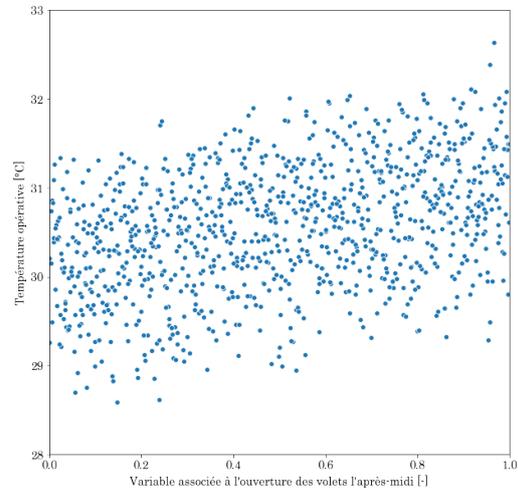
Sur la Figure 3.20, le principe de détermination du coefficient « +1 » ou « -1 » via le coefficient de Spearman associé à chaque variance partielle est présenté. Les Figures 3.20a et 3.20b montrent respectivement que l'ouverture des fenêtres le matin tend à faire diminuer la température opérative dans le séjour-cuisine le 29/07 à 7h alors que l'effet in-

verse est observé pour l'ouverture des volets l'après-midi le 29/07 à 14h. Physiquement, le signe obtenu de l'impact de l'ouverture des fenêtres s'explique par le signe de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Les Figures 3.20c et 3.20d présentent le principe de détermination du coefficient de Spearman. Seul le signe de ce coefficient est retenu dans cette étude.

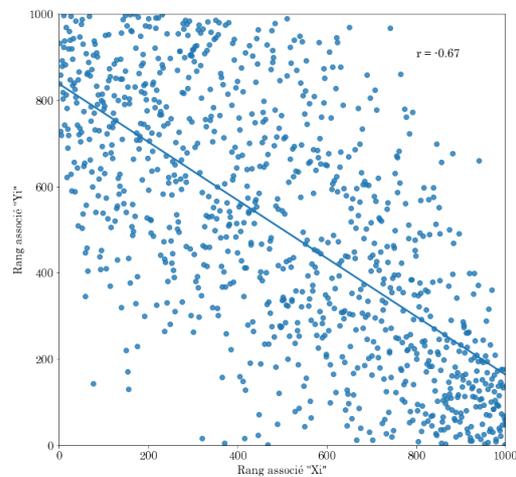
3.3. Déroulement de la méthodologie sur une maison existante



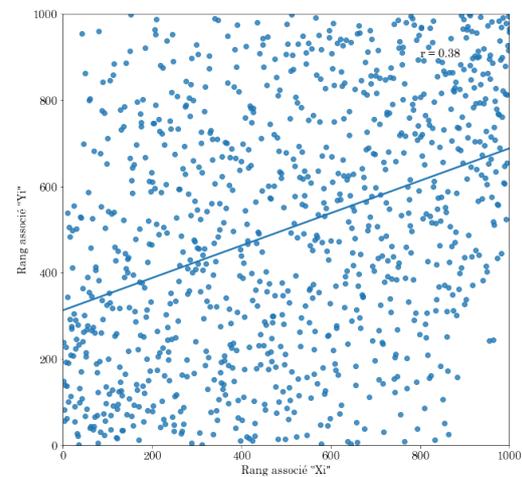
(a) Température opérative obtenue en fonction de la variable associée à l'ouverture des fenêtres le matin, le 29/07 à 07h



(b) Température opérative obtenue en fonction de la variable associée à l'ouverture des volets l'après-midi, le 29/07 à 14h



(c) Rang de la température opérative obtenue en fonction du rang de la variable associée à l'ouverture des fenêtres le matin et régression linéaire, le 29/07 à 07h



(d) Rang de la température opérative obtenue en fonction du rang la variable associée à l'ouverture des volets l'après-midi et régression linéaire, le 29/07 à 14h

Figure 3.20 – Principe de détermination du coefficient de Spearman pour deux heures différentes, le coefficient de Spearman correspond au coefficient de régression linéaire entre les rangs des observations

Les coefficients ont été déterminés pour chaque heure et chaque action. Sur la Figure 3.21, les différents coefficients retrouvés pour l'action liée à l'ouverture des fenêtres le midi ont été résumés. L'ouverture des fenêtres le midi est donc une action qui fait augmenter la température durant certaines heures (3 heures) et diminuer pendant d'autres heures. Ainsi, une même action peut avoir deux effets, échauffement de la température intérieure ou rafraîchissement. Pour faciliter le déroulement des calculs, ces coefficients sont calculés avant application des critères d'influence. Ainsi le signe du coefficient de Spearman est déterminé même si l'influence d'une action n'est pas jugée significative.

0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
5	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
6	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
7	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
9	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
10	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
11	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
12	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
13	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
14	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
15	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
16	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
17	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
18	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
19	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
20	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
21	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
22	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
23	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
	2018-07-25	2018-07-26	2018-07-27	2018-07-28	2018-07-29	2018-07-30	2018-07-31	2018-08-01	2018-08-02	2018-08-03	2018-08-04	2018-08-05	2018-08-06	2018-08-07	2018-08-08

Figure 3.21 – Signes associés à la variance partielle de l'ouverture des fenêtres le midi pour chaque heure de la période d'étude

Variances partielles signées des actions

Les signes retrouvés sont alors appliqués aux précédents résultats de variances partielles afin d'obtenir des variances partielles signées.

Sur la Figure 3.22, les profils de variance partielle signée de chaque action influente sont tracés. Pour chaque heure, on peut alors observer l'influence de chaque action sur la température opérative, l'intensité de cette influence et le sens de cette influence.

Tout d'abord, il est important de rappeler que les variances partielles, qu'elles soient signées ou non, sont nulles si : la variance totale V calculée au pas de temps est inférieure à $0,06^{\circ}C^2$ ou l'indice de sensibilité du premier ordre associé à une action est inférieur à 5%. Ainsi, la variance partielle de l'ouverture des fenêtres le midi est nulle pour les trois heures du 27 et 28 juillet où elle induit une hausse des températures d'après les coefficients utilisés pour signer les variances partielles (Figure 3.21). En effet, le profil de variance partielle signée de cette action ne montre pas de valeurs positives. Les valeurs sont soit négatives soit nulles.

Si l'on s'intéresse à un instant précis, par exemple le 3 août à minuit, on retrouve que le choix du taux d'ouverture des volets le matin est l'action qui influe le plus sur la température de la zone séjour-cuisine à cette heure-là et que cette action tend à faire augmenter la température. Au contraire, la ventilation mécanique nocturne tend au même moment à la faire diminuer. Mais les niveaux d'intensité de ces effets varient d'une heure à l'autre. Avec les profils présentés, il est alors difficile de conclure sur la robustesse du bâtiment vis à vis des actions des occupants ou même de conclure sur l'impact d'une action sur l'ensemble de la période de canicule. Pour faciliter l'interprétation des profils présentés, des indicateurs sont alors créés.

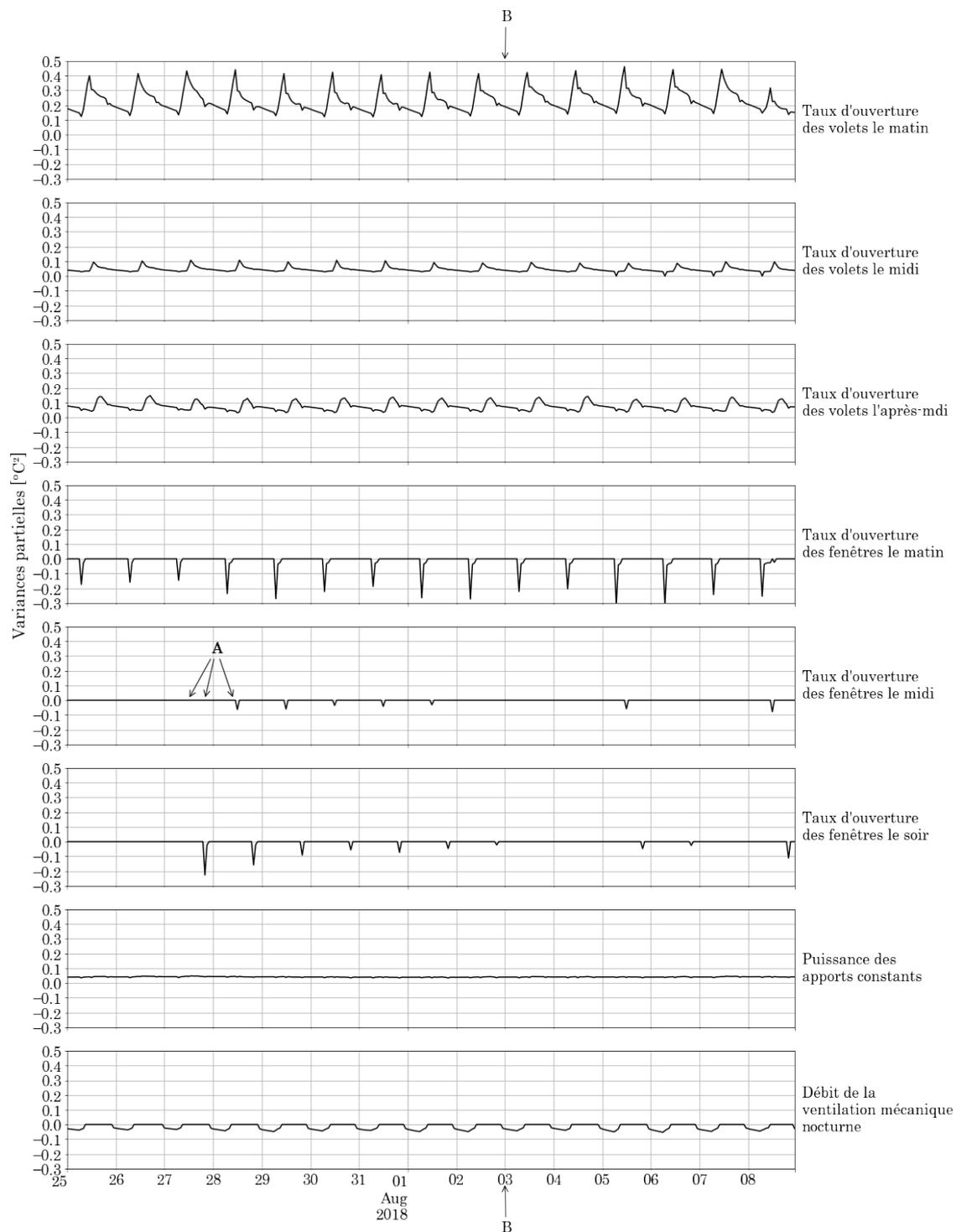


Figure 3.22 – Évolution de la variance partielle signée associée à chaque action
L'intensité maximale des variances partielles est observable :

- (A) Heures durant lesquelles le signe associé à l'action relative aux ouvertures de fenêtres le midi est « +1 »
- (B) Délimitation de l'instant correspondant aux 3 août à minuit

3.3.9 Vers de nouveaux indicateurs

L'étude des variances partielles signées a montré la possibilité de quantifier l'impact de chaque action en termes d'intensité et de durée sur la réponse thermique du bâtiment au pas de temps horaire. Pour évaluer aisément la réponse thermique d'un bâtiment, 5 indicateurs sont mis en place. Ils représentent :

- la capacité d'un bâtiment à résister à la montée en température associée à une action \Rightarrow *indicateur d'échauffement*
- la capacité d'un bâtiment à profiter d'un rafraîchissement associé à une action \Rightarrow *indicateur de rafraîchissement*
- la capacité d'un bâtiment à résister dans le temps à la montée en température associée à une action \Rightarrow *indicateur d'échauffement global*
- la capacité d'un bâtiment à profiter dans le temps d'un rafraîchissement associé à une action \Rightarrow *indicateur de rafraîchissement global*
- la capacité d'un bâtiment à être résilient face à une action \Rightarrow *indicateur de résilience*

Définition mathématique des indicateurs

L'indicateur d'échauffement est défini comme étant la variance partielle positive maximale d'une action calculée sur la période d'étude. Cet indicateur a donc pour unité le $^{\circ}\text{C}^2$. Plus l'indicateur d'échauffement associé à une action est élevé moins le bâtiment est capable de résister à la montée en température induite par cette action. L'échauffement de l'action i est calculé à partir de l'équation 3.7 avec V_i^* la variance partielle signée de l'action i . t_0 et t_{max} représentent respectivement la première heure et la dernière heure de la période étudiée.

$$echauffement(i) = \max_{t_0 \leq t \leq t_{max}} V_i^*(t) \left\{ V_i^*(t) > 0 \right. \quad (3.7)$$

L'indicateur de rafraîchissement est défini comme étant la variance partielle négative maximale en valeur absolue d'une action calculée sur la période d'étude. Cet indicateur a donc pour unité le $^{\circ}\text{C}^2$. Plus l'indicateur de rafraîchissement associé à une action est élevé en valeur absolue, plus le bâtiment est capable de bénéficier de la diminution de la température induite par cette action. Le rafraîchissement de l'action i est calculé à partir de l'équation 3.8.

$$rafraichissement(i) = - \max_{t_0 \leq t \leq t_{max}} |V_i^*(t)| \left\{ V_i^*(t) < 0 \right. \quad (3.8)$$

L'indicateur d'échauffement global est défini comme étant l'ensemble de la variance partielle positive d'une action intégrée sur la période d'étude. Cet indicateur a donc pour unité le $^{\circ}\text{C}^2.h$. Plus l'indicateur d'échauffement global associé à une action est élevé moins le bâtiment est capable de résister à cette action sur l'ensemble de la période d'étude. L'échauffement global de l'action i est calculé à partir de l'équation 3.9.

$$echauffement\ global(i) = \int_{t_0}^{t^{max}} V_i^*(t) dt \left\{ V_i^*(t) > 0 \right. \quad (3.9)$$

L'indicateur de rafraîchissement global est défini comme étant l'ensemble de la variance partielle négative d'une action intégrée sur la période d'étude. Cet indicateur a donc pour unité le $^{\circ}\text{C}^2.h$. Plus l'indicateur de rafraîchissement global associé à une action est élevé en valeur absolu, plus le bâtiment est capable de profiter du rafraîchissement induit par cette action sur l'ensemble de la période d'étude. Le rafraîchissement global de l'action i est calculé à partir de l'équation 3.10.

$$rafraichissement\ global(i) = - \int_{t_0}^{t^{max}} |V_i^*(t)| dt \left\{ V_i^*(t) < 0 \right. \quad (3.10)$$

L'indicateur de résilience est défini comme étant la durée la plus longue en heures durant laquelle la variance partielle d'une action est non nulle. Dans cette étude, la variance partielle signée d'une action peut être nulle dans deux cas déjà énoncés précédemment :

- la variance totale V calculée au pas de temps t est inférieure à $0,06^{\circ}\text{C}^2$
- et l'indice de sensibilité du premier ordre associé à une action à l'instant t est inférieur à 5%.

Plus l'indicateur de résilience est élevé, plus le bâtiment est influencé dans le temps par une action. La résilience du bâtiment face à l'action i est calculée à partir de l'équation 3.11.

$$resilience(i) = \max [t_p - t_k] \left\{ \begin{array}{l} V_i^*(t) \neq 0 \forall t \in [t_k; t_p] \\ t_p, t_k \in [t_0; t_{max}] \\ p > k \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Calcul des indicateurs sur le cas test

Le calcul de ces indicateurs pour chaque action dans la zone séjour-cuisine est présenté dans le Tableau 3.5. L'introduction des indicateurs d'échauffement global et de rafraîchissement global est justifiée par le fait que regarder seulement l'intensité maximale avec laquelle une action affecte la réponse thermique du bâtiment n'est pas suffisant pour juger de la réponse du bâti vis à vis de cette action. En effet, par exemple, même si la ventilation mécanique nocturne semble être l'action dont le bâtiment tire le moins de rafraîchissement avec un indicateur de rafraîchissement de $-0,05^{\circ}\text{C}^2$, sur le long terme, c'est à dire sur la durée de la période d'étude, le rafraîchissement global engendré est de $-5,50^{\circ}\text{C}^2.h$. Le rafraîchissement global engendré par l'ouverture des fenêtres le matin est 5 fois supérieur à celui des fenêtres le soir avec un indicateur de rafraîchissement global de $-4,42^{\circ}\text{C}^2$ contre $-0,97^{\circ}\text{C}^2$ pour l'ouverture des fenêtres le soir.

Les indicateurs d'échauffement et d'échauffement global révèlent que le bâtiment est fortement sensible aux ouvertures de volets. L'échauffement induit par l'ouverture des volets le matin est de $0,46^{\circ}\text{C}^2$ et respectivement de $0,11^{\circ}\text{C}^2$ et $0,15^{\circ}\text{C}^2$ pour l'ouverture de volets le midi et l'après-midi. Il en est de même pour les effets sur le long terme, où l'indicateur d'échauffement global pour l'ouverture des volets le matin, le midi et l'après-midi sont respectivement de $82,07^{\circ}\text{C}^2.h$, $16,32^{\circ}\text{C}^2.h$ et de $26,49^{\circ}\text{C}^2.h$. L'échauffement global des équipements utilisés en journée est nul mais pour les équipements en veille, il est de $14,85^{\circ}\text{C}^2.h$. Ainsi le bâtiment est plus sensible aux apports externes qu'aux apports internes.

Enfin, la résilience du bâtiment à certaines actions est supérieure à 24 heures. Cela signifie que d'une journée à l'autre les effets de ces actions sont encore significatifs. Ainsi, pendant 271 heures consécutives, la variance partielle associée aux ouvertures des volets le midi est non nulle, c'est à dire que pour ces 271 heures la variance totale est significative ($>0,06^{\circ}\text{C}$) et l'influence de cette action sur cette variance représente une part non négligeable ($>5\%$). Les actions reliées aux ouvertures des volets le matin, l'après midi et aux équipements en veille ont la résilience la plus longue, les actions sont influentes sur la totalité de la période soit 360 heures.

Tableau 3.5 – Calculs des 5 indicateurs obtenus pour le cas test pour les actions influentes

Actions \ Indicateurs	Échauffement [°C ²]	Rafrâichissement [°C ²]	Échauffement global [°C ² .h]	Rafrâichissement global [°C ² .h]	Résilience [h]
Ouverture des fenêtres le matin	-	-0.31	-	-4.42	5
Ouverture des fenêtres le midi	-	-0.08	-	-0.37	1
Ouverture des fenêtres le soir	-	-0.23	-	-0.91	2
Ouverture des volets le matin	0.46	-	82.07	-	360
Ouverture des volets le midi	0.11	-	16.32	-	271
Ouverture des volets l'après-midi	0.15	-	26.49	-	360
Fonctionnement d'équipements en mode veille	0.05	-	14.85	-	360
Utilisation de la surventilation mécanique nocturne	-	-0.05	-	-5.50	12

Afin de réaliser une étude plus spécifique en fonction de l'usage de chaque zone, dans une pièce de vie la journée et dans une pièce de nuit la nuit, les indicateurs sont calculés de nouveau dans le séjour-cuisine uniquement la journée de 07h à 22h et dans une des chambres la nuit de 22h à 07h. Le résultat du calcul des indicateurs se trouvent respectivement dans le Tableau 3.6 et le Tableau 3.7.

Étude spécifique à une zone jour

Les indicateurs calculés dans la pièce à vivre en journée montrent, à la différence de l'étude portant sur la totalité de la période, qu'en ne considérant que le confort sur les heures allant de 07h à 22h, le bâtiment tire plus de bénéfice sur ces heures là de l'ouverture des fenêtres le matin que de la surventilation nocturne. En effet, l'indicateur de rafraîchissement global de l'ouverture des fenêtres le matin est de $-4,42^{\circ}\text{C}^2.h$ et de $-1,88^{\circ}\text{C}^2.h$ pour la surventilation nocturne.

La journée, le bâtiment reste sensible dans la zone séjour-cuisine au taux d'ouverture des volets le matin pour lequel l'échauffement global est de $60,36^{\circ}\text{C}^2.h$. En réduisant la période d'étude uniquement aux heures de la journée, l'indicateur d'échauffement global des ouvertures des volets le matin, le midi, l'après-midi et le fonctionnement des équipements en mode veille, sont réduits d'environ un tiers par rapport au cas où toutes les heures sont comptabilisées.

Toutes les actions pour lesquelles l'indicateur de résilience montrait que les effets de ces actions pouvaient persister d'une journée à l'autre sont égales à 16 heures soit la tota-

lité d'une journée d'étude.

Tableau 3.6 – Calculs des 5 indicateurs dans le séjour-cuisine la journée de 07h à 22h pour les actions influentes

Actions \ Indicateurs	Échauffement [°C ²]	Rafrâichissement [°C ²]	Échauffement global [°C ² .h]	Rafrâichissement global [°C ² .h]	Résilience [h]
Ouverture des fenêtres le matin	-	-0.31	-	-4.42	5
Ouverture des fenêtres le midi	-	-0.08	-	-0.37	1
Ouverture des fenêtres le soir	-	-0.23	-	-0.91	2
Ouverture des volets le matin	0.46	-	60.36	-	16
Ouverture des volets le midi	0.11	-	11.76	-	16
Ouverture des volets l'après-midi	0.15	-	18.05	-	16
Fonctionnement d'équipements en mode veille	0.05	-	9.92	-	16
Utilisation de la surventilation mécanique nocturne	-	-0.05	-	-1.88	5

Étude spécifique à une zone nuit

La chambre 1 bénéficie uniquement du rafraîchissement apporté par la surventilation mécanique nocturne. Les indicateurs de rafraîchissement et de rafraîchissement global sont respectivement de $-0,07^{\circ}\text{C}^2$ et de $-5,96^{\circ}\text{C}^2.h$.

L'ouverture des volets le matin est également l'action à laquelle cette zone thermique est la plus sensible. L'indicateur d'échauffement global est de $25,28^{\circ}\text{C}^2.h$ soit 2,5 fois plus que l'indicateur d'échauffement global de l'ouverture des volets l'après-midi. Dans cette zone, la nuit, la température opérative est alors plus sensible aux apports de chaleur externes qu'aux apports de chaleur internes.

Ces indicateurs intégrés permettent ainsi de mieux caractériser l'influence de chaque action sur la température opérative ce qui permet de mieux les comparer et donc de déterminer les plus utiles pour le maintien du confort intérieur en période estivale.

Tableau 3.7 – Calculs des 5 indicateurs dans la chambre 1 de 22h à 7h pour les actions influentes

Actions \ Indicateurs	Échauffement [°C ²]	Rafrâichissement [°C ²]	Échauffement global [°C ² .h]	Rafrâichissement global [°C ² .h]	Résilience [h]
Ouverture des volets le matin	0.22	-	25.28	-	10
Ouverture des volets le midi	0.05	-	5.12	-	10
Ouverture des volets l'après-midi	0.09	-	9.94	-	10
Fonctionnement d'équipements en mode veille	0.05	-	6.84	-	10
Utilisation de la surventilation mécanique nocturne	-	-0.07	-	-5.96	8

Utilisation de ces nouveaux indicateurs

Ce chapitre a permis de présenter la méthodologie, développée dans le cadre de ces travaux de thèse, qui aboutit à la création de 5 nouveaux indicateurs. Ces indicateurs d'**échauffement**, de **rafrâichissement**, d'**échauffement global**, de **rafrâichissement global** et de **résilience** évaluent la capacité d'un bâtiment à limiter la hausse de la température due à une action ou, au contraire, d'évaluer la capacité d'un bâtiment à bénéficier d'une action pour être rafraîchi. La persistance de l'impact des actions sur le bâtiment peut également être évaluée. Ces indicateurs vont être utilisés dans le prochain chapitre dans un contexte d'aide à la décision pour les concepteurs de maisons individuelles.

4

Évaluation de la robustesse d'une conception de bâtiment et recherche d'éco-comportements

Dans ce chapitre, les indicateurs issus de la méthodologie proposée au chapitre 3 sont appliqués pour comparer deux choix de conception et deux choix de gestion du bâti. Pour le choix de conception, on regarde comment les indicateurs peuvent être utilisés pour comparer la robustesse de plusieurs variantes d'un même bâtiment à des actions des habitants, pour retrouver les forces et faiblesses de chacune des variantes de conception testées. Pour comparer et proposer un choix de gestion pour chaque variante, un nouveau mode de gestion de la ventilation reposant sur les actions des occupants est évalué en termes de performance à faire baisser la température.

Sommaire

4.1	Introduction	111
4.2	Comparaison de deux variantes d'un bâtiment : impact de l'inertie	111
4.2.1	Objectif et contexte de l'étude	111
4.2.2	Démarche employée	113
4.2.3	Résultats obtenus pour la zone de jour	115
4.2.4	Résultats obtenus pour la zone de nuit	124
4.2.5	Conclusion de l'étude	132
4.3	Comparaison de deux modes de gestion : pertinence du recours à la ventilation naturelle nocturne	133
4.3.1	Objectif et contexte de l'étude	133
4.3.2	Démarche employée	133
4.3.3	Résultats obtenus pour la zone jour	135
4.3.4	Résultats obtenus dans la zone nuit	141
4.4	Conclusion : des comportements adaptés	146

4.1 Introduction

À partir de la méthodologie présentée au Chapitre 3, la comparaison de la robustesse de différentes variantes d'un projet de bâtiment à des combinaisons d'actions possibles des occupants peut être faite. Pour chaque variante, la méthodologie permet d'obtenir, à l'aide d'une analyse de sensibilité temporelle, l'intensité et la persistance de l'influence d'une action sur la réponse thermique du bâtiment. Cette réponse thermique est caractérisée par 5 indicateurs construits au chapitre précédent :

- l'indicateur d'échauffement qui évalue la capacité d'un bâtiment à ne pas résister à la montée en température associée à une action,
- l'indicateur de rafraîchissement qui évalue la capacité d'un bâtiment à profiter d'un rafraîchissement associé à une action,
- l'indicateur d'échauffement global qui évalue la capacité d'un bâtiment à ne pas résister dans le temps à la montée en température associée à une action,
- l'indicateur de rafraîchissement global qui évalue la capacité d'un bâtiment à profiter dans le temps d'un rafraîchissement associé à une action,
- et l'indicateur de résilience qui évalue la capacité d'un bâtiment à être résilient face à une action.

La comparaison des indicateurs permet alors d'évaluer et de comparer la robustesse de chaque variante et le confort d'été induits par les différentes actions. En effet, le choix d'une variante de conception robuste aux actions des habitants n'est pas forcément le choix qui induit une meilleure performance vis à vis du confort en fonction du mode de vie des habitants.

4.2 Comparaison de deux variantes d'un bâtiment : impact de l'inertie

4.2.1 Objectif et contexte de l'étude

L'inertie d'un bâtiment influence fortement sa réponse thermique. Pour un bâtiment à forte inertie, on parle alors d'amortissement et de déphasage de la réponse thermique de celui-ci lorsqu'il est soumis à des sollicitations thermiques. Pour un bâtiment à faible inertie, l'amortissement et le déphasage sont moindres. L'inertie d'un bâtiment influençant sa réponse thermique à des sollicitations en termes d'intensité et d'effet dans le temps, l'utilisation de ces nouveaux indicateurs peut être particulièrement pertinente.

Dans le cadre de ce travail de thèse, les variantes testées sont celles d'un bâtiment pour lequel la position de l'isolation de l'enveloppe correspond à une configuration ITI (Isolation Thermique Intérieure) ou ITE (Isolation Thermique Extérieure). Ces deux variantes ont été créées à partir du modèle de bâtiment du cas test du Chapitre 3. Les modifications faites se rapportent à l'emplacement de l'isolation des murs extérieurs et du plancher bas donnant sur le vide sanitaire. L'emplacement des couches d'isolant est visible pour chaque configuration sur la Figure 4.1. Pour la configuration ITI, l'inertie des murs et de la dalle du plancher bas n'est pas accessible car les différentes couches d'isolants sont placées sur la couche la plus interne de ces parois, au contraire, pour la configuration ITE l'inertie des parois est accessible puisque les couches d'isolants sont placées sur la face externe de la couche de parpaings pour les murs et sur la face externe de la dalle béton du plancher bas. Dans [Gondian *et al.* \(2019\)](#), cette méthodologie a été appliquée pour comparer la robustesse et l'influence des actions pour des variantes avec et sans casquettes solaires.

Les deux bâtiments ont alors une enveloppe ayant une résistance thermique identique. La modélisation des ponts thermiques est simplifiée et des valeurs de ponts thermiques identiques ont été conservées dans les deux variantes pour se concentrer sur la différence de réponse due à l'inertie seule.

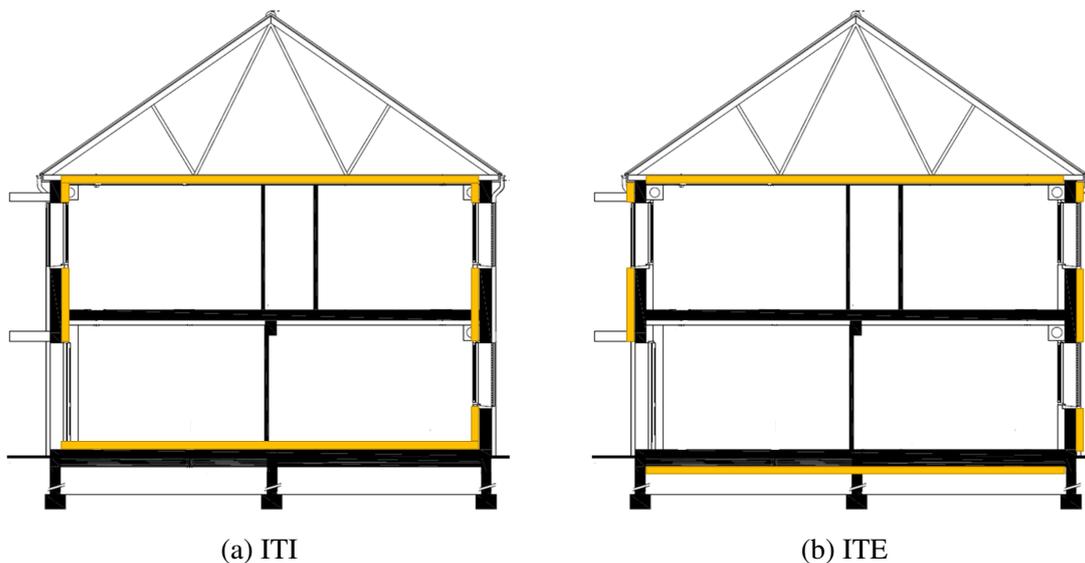


Figure 4.1 – Emplacement de l'isolation de l'enveloppe (en jaune) en fonction de la variante testée

4.2.2 Démarche employée

Pour chaque variante de conception testée, un modèle EnergyPlus du bâtiment est créé. Puis, on sélectionne les actions des occupants à évaluer sur une plage horaire de fonctionnement. Une plage de valeurs dans laquelle l'action peut varier ainsi qu'une loi de probabilité sont associées à chaque action. Une loi de probabilité uniforme avec des bornes correspondant à la plage de fonctionnement de l'équipement sur lequel l'occupant agit a été utilisée afin de conclure statistiquement sur l'influence d'une action sur la totalité de sa plage de variation possible. Pour le cas des actions où les valeurs ne sont pas limitées, des plages de variations larges ont été retenues (3.3.1). Les actions et leur plage de fonctionnement introduites dans le Chapitre 3 sont réutilisées ici. Ces différentes actions ainsi que leur plage de variations sont rappelées dans le Tableau 4.1.

À partir de cette sélection, 1000 combinaisons d'actions différentes sont générées par l'approche LHS. Ces 1000 combinaisons d'actions sont propagées dans le modèle de chaque variante du bâtiment. Le nombre important de simulations (1000) pour chaque modèle est nécessaire pour permettre la convergence des indices de sensibilité. Le fichier météo utilisé est identique à celui déjà présenté (3.2.4).

Tableau 4.1 – Récapitulatif des actions et de leur plage de fonctionnement utilisées pour générer les échantillons

Actions	Plage horaire	Distribution	Min.	Max.
1 - Ouverture des fenêtres le matin	7h - 7h10	Uniforme	0%	100%
2 - Ouverture des fenêtres le midi	12h - 12h10	Uniforme	0%	100%
3 - Ouverture des fenêtres le soir	20h - 20h10	Uniforme	0%	100%
4 - Ouverture des volets le matin	8h - 12h	Uniforme	0%	100%
5 - Ouverture des volets le midi	12h - 14h	Uniforme	0%	100%
6 - Ouverture des volets l'après-midi	14h - 18h	Uniforme	0%	100%
7 - Ouverture des volets le soir	18h - 21h	Uniforme	0%	100%
8 - Utilisation d'équipements le matin	7h - 8h	Uniforme	2.3 [W/m ²]	6.9 [W/m ²]
9 - Utilisation d'équipements le midi	12h - 13h	Uniforme	2.3 [W/m ²]	6.9 [W/m ²]
10 - Utilisation d'équipements le soir	20h - 21h	Uniforme	2.3 [W/m ²]	6.9 [W/m ²]
11 - Fonctionnement d'équipements en mode veille	24h / 24	Uniforme	0.55 [W/m ²]	1.65 [W/m ²]
12 - Utilisation de la surventilation mécanique nocturne	22h - 7h	Uniforme	90 [m ³ /h]	150 [m ³ /h]

La sortie d'intérêt de cette étude est la température opérative spatialement et temporellement étudiée dans la zone de jour en journée et une zone de nuit durant la nuit sur la période allant du 25 juillet au 09 août 2018. Ainsi, la robustesse de chaque conception est évaluée vis à vis des actions des occupants en période de forte chaleur sur deux pièces avec des destinations d'usages différentes. Les variances partielles signées, introduites au Chapitre 3, permettent d'évaluer quantitativement l'intensité et la persistance de l'in-

fluence de chaque action seule sur la dispersion observée de la température opérative. Les indicateurs sont utilisés afin d'agrégier l'ensemble des résultats visibles sur les courbes temporelles des variances partielles signées et sont utilisables pour comparer aisément la réponse thermique de chaque variante de bâtiment aux différentes actions.

Un schéma récapitulatif de la démarche globale employée est présenté sur la Figure 4.2.

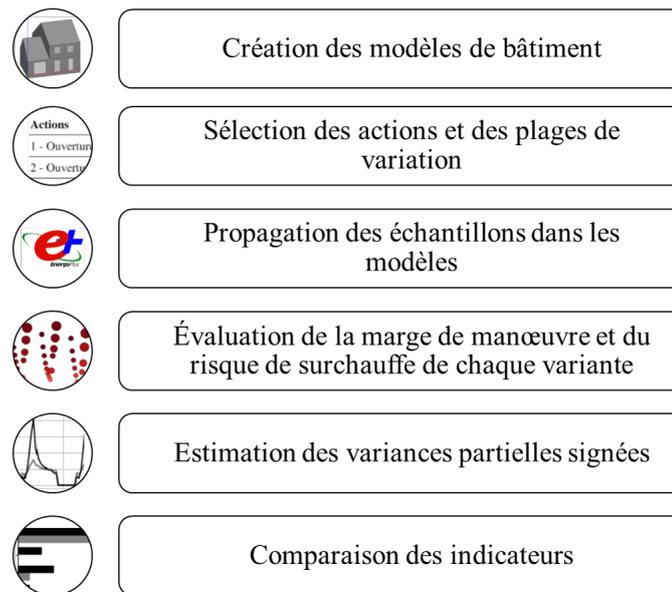


Figure 4.2 – Récapitulatif des étapes pour comparer l'influence des actions sur différentes variantes d'un bâtiment

4.2.3 Résultats obtenus pour la zone de jour

Étude des courbes enveloppes

Dans un premier temps, la Figure 4.3 montre uniquement l'évolution des deux courbes enveloppes dans lesquelles se trouvent 950 des 1000 profils de température obtenus de chaque variante. Représentée en couleur foncée, on retrouve sur ce graphique que la variante ITI permet d'obtenir des températures plus basses sur certaines nuits que la variante ITE. Cependant, en journée, les températures sont bien plus élevées que pour la variante ITE. Sur la totalité de la période étudiée, la plage dans laquelle se trouvent les valeurs de température opérative dans le séjour-cuisine étant plus large pour la variante ITI que la variante ITE, on peut en déduire que cette variante est plus sensible aux actions des occupants et donc moins robuste que la variante ITE. Pour mieux visualiser la marge de manœuvre sur la température et le risque d'inconfort suite aux différentes combinaisons d'actions, une autre représentation graphique a été construite.

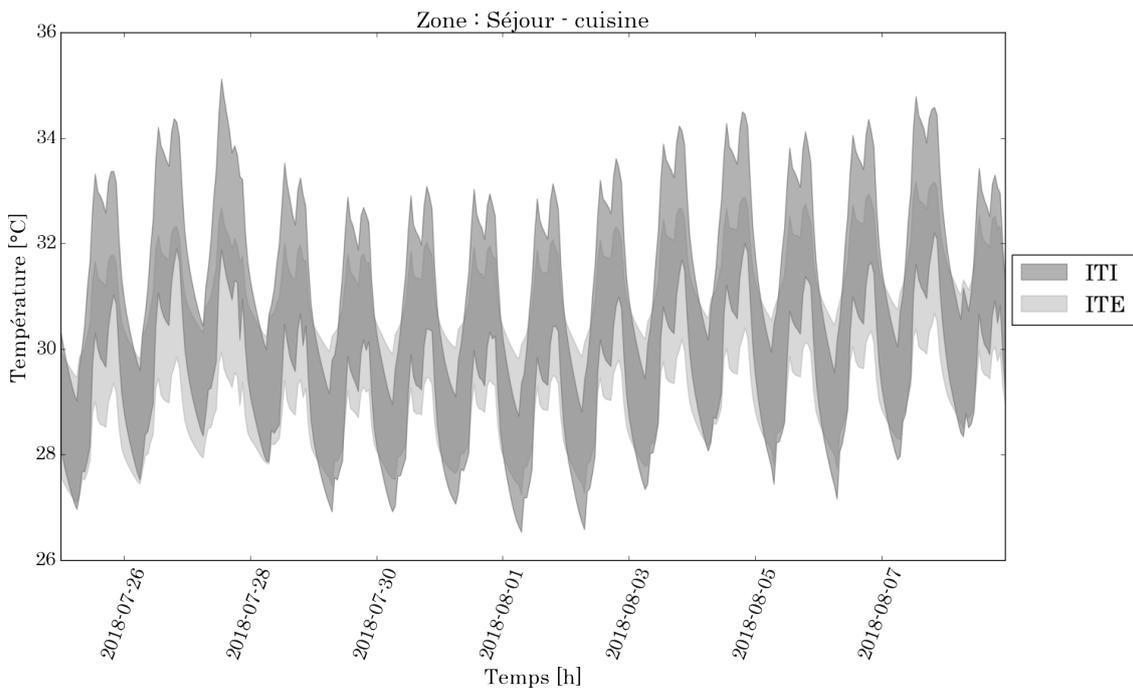


Figure 4.3 – Évolution des courbes enveloppes des profils de température obtenus dans la zone de jour pour chacune des variantes, la couleur la plus foncée représente la superposition des courbes enveloppes

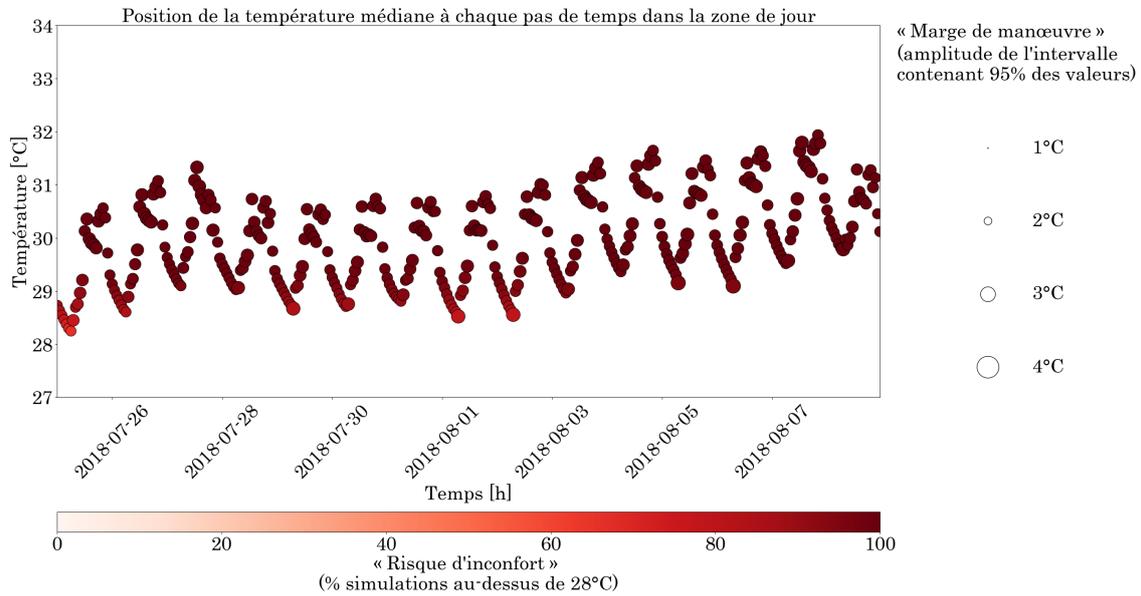
Étude des risques et marge de manœuvre

Sur les Figures 4.4a et 4.4b, on rappelle que sur les courbes présentées la taille de chaque point correspond à l'intervalle dans lequel se trouvent 95 % des valeurs de température opérative. La couleur des points représente le nombre de simulations au-dessus de 28°C pour chaque heure en fonction des 1000 résultats de simulation.

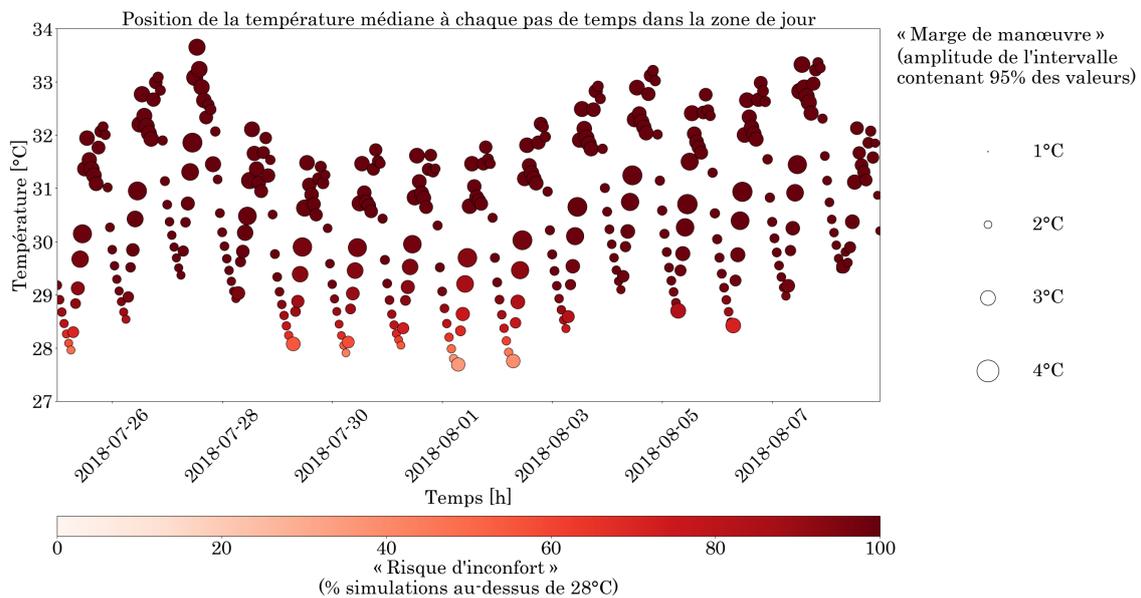
En comparant l'évolution des températures médianes obtenues pour chaque heure, on observe une nette différence de comportement. Pour la configuration ITE, sur la période allant du 25 juillet au 9 août, l'ensemble des températures médianes se trouvent dans l'intervalle [28°C ; 32°C] alors que pour la variante ITI, cet intervalle est plus large [27°C ; 34°C]. Les températures médianes étant plus dispersées, on retrouve que, sur la durée d'observation, la variante ITE est plus robuste que la variante ITI aux actions des occupants testées.

Ensuite, l'étude de la dispersion des températures au niveau horaire montre également que la variante ITI est plus sensible aux actions des occupants car on observe sur la Figure 4.4b des heures durant lesquelles la taille des points reflète une marge de manœuvre supérieure à 4°C. Pour la variante ITE, celle-ci se limite à 3°C.

De la variabilité de la température, on peut en déduire la robustesse d'un bâtiment mais on obtient peu d'informations sur la performance relative au confort dans ce bâtiment. Pour cela, on s'intéresse à la couleur de chaque point c'est-à-dire au pourcentage de simulation au-dessus de 28°C. On remarque que la variante ITI permet plus fréquemment d'obtenir des températures en dessous de 28°C que la variante ITE. En comparant les deux courbes, on observe en effet que le nombre de points clairs est plus important sur la courbe 4.4b que sur la courbe 4.4a. En plus d'être moins fréquent, le risque d'inconfort est plus faible sur certaines heures pour la variante ITI car la couleur des points suggère un risque aux alentours de 20% alors que le risque n'est jamais en dessous de 60% dans la variante ITE. La variante la plus robuste n'induit alors pas nécessairement des températures intérieures plus faibles. Ces observations ne concernant que certaines heures de la période étudiée, il est difficile de conclure sur une variante plus performante que l'autre vis à vis du confort. On peut en conclure que pour des comportements identiques, la réponse thermique des deux bâtiments diffère fortement et qu'il faut alors étudier l'influence de chaque action sur la température pour comprendre le fonctionnement de ces deux variantes.



(a) ITE



(b) ITI

Figure 4.4 – Étude des risques et de la marge de manœuvre possible pour les deux variantes dans la zone de jour

Analyse de sensibilité temporelle

Les variances partielles signées introduites au Chapitre 3 sont déterminées et tracées pour les deux variantes et pour chaque action sur la Figure 4.5.

Dans la zone de jour, on ne s'intéresse qu'à l'étude de l'influence des différentes actions sur les heures de journée, de 7h à 22h. Le reste du temps, les variances partielles sont forcées à la valeur zéro pour plus de lisibilité. Afin de ne visualiser que des influences significatives, on rappelle que deux critères sont appliqués :

- la variance totale V calculée au pas de temps t doit être supérieure à $0,06^{\circ}C^2$ ce qui correspond à un écart relatif minimal σ de $0,25^{\circ}C$
- et l'indice de sensibilité du premier ordre associé à une action doit être supérieur à 5%.

On rappelle, par exemple, qu'on parle de l'influence de l'action liée ou relative à l'ouverture des volets le matin ou de l'influence du taux d'ouverture des volets le matin. Par abus de langage, dans ce manuscrit, l'influence de l'ouverture des volets le matin fait également référence à l'action des occupants.

On remarque en comparant l'évolution des variances partielles signées associées au taux d'ouverture des volets le matin, le midi et l'après-midi les différences de dynamique de l'influence de ces actions suivant les variantes. Il est clairement visible que les influences de ces actions sont plus fortes en termes d'intensité dans la variante ITI. Cependant, lorsque les pics d'influence de ces actions sont passés, les variances partielles calculées pour la variante ITE peuvent être plus élevées témoignant d'une persistance plus importante. Les indicateurs doivent refléter ce phénomène et aider à leur traduction en termes d'ordre de grandeur.

Les écarts de variances partielles sont moins visibles pour les actions où uniquement des pics de variances sont présents à cause de la superposition des courbes, il faut donc compter sur les indicateurs pour comparer les différentes influences des actions.

4.2. Comparaison de deux variantes d'un bâtiment : impact de l'inertie

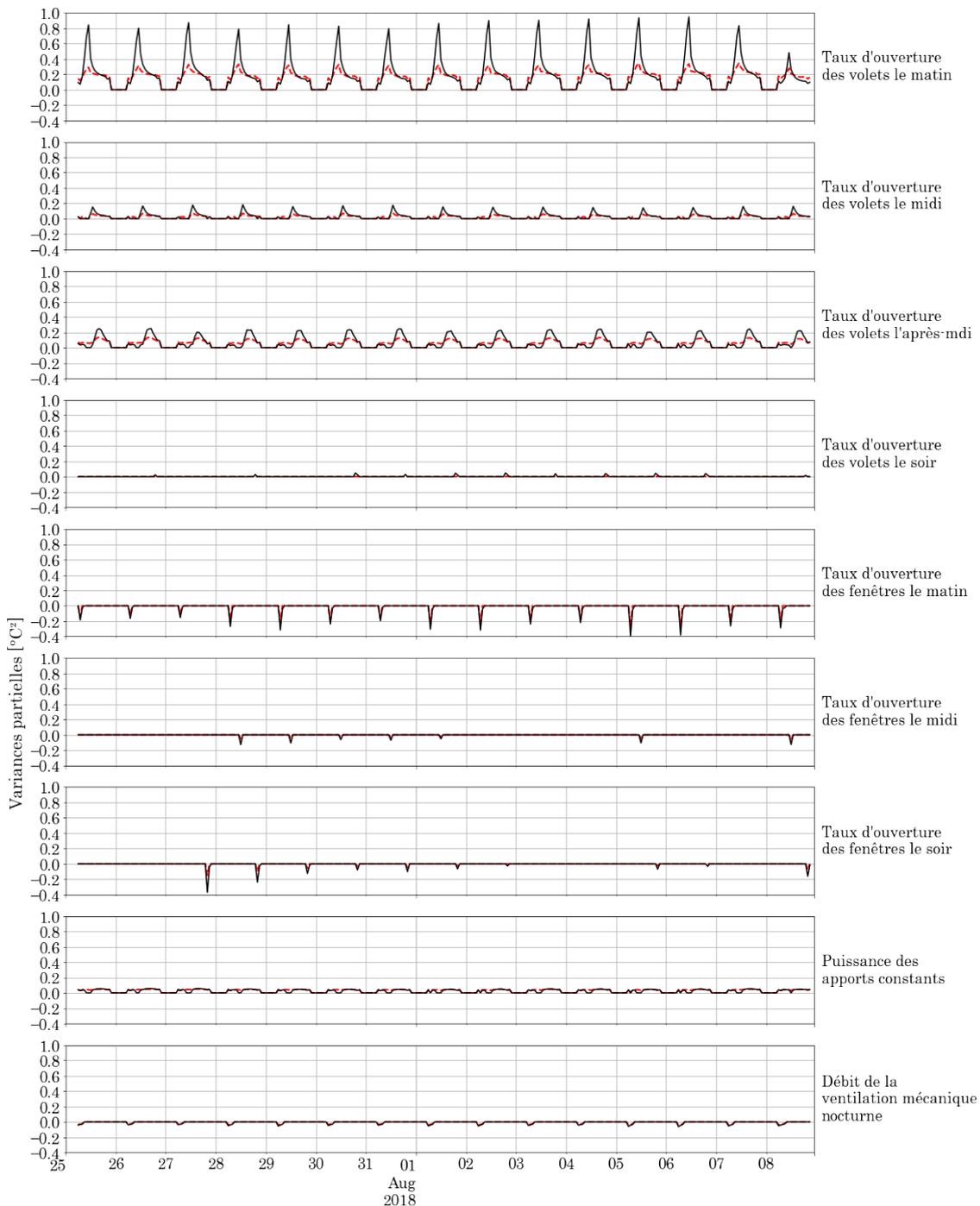


Figure 4.5 – Évolution des variances partielles signées pour les 12 actions testées sur la période allant du 25 juillet au 9 août dans la zone séjour-cuisine sur les heures de journée de 7h à 22h pour la variante ITI (en noir) et la variante ITE (en rouge)

Comparaison des indicateurs

De par leur définition mathématique, les indicateurs d'échauffement et de rafraîchissement traduisent l'intensité maximale avec laquelle une action influe sur la variabilité de la température en fonction de sa capacité à la faire augmenter ou diminuer, sur la période d'étude.

Les indicateurs d'échauffement global et de rafraîchissement global quant à eux tiennent compte de la dimension temporelle des influences respectives de chaque action sur la température. A la différence des indicateurs précédents qui donnent une information ponctuelle, ceux-ci donnent une influence quantitative cumulée sur la période traduisant la persistance de la sensibilité relative aux actions.

L'indicateur de résilience donne un aperçu de durée avec laquelle une action influe sur cette température.

La comparaison des indicateurs d'échauffement et d'échauffement global reflète bien les précédentes observations, la variante ITI du bâtiment est plus sensible aux apports solaires en termes d'intensité que la variante ITE. La conception par ITI est particulièrement sensible à la gestion des volets par les occupants, principalement le matin, pour laquelle l'indicateur d'échauffement est deux fois plus élevé que pour la variante ITE comme on peut le voir sur la Figure 4.6a. Sur cette figure, on retrouve en abscisse la valeur de l'indicateur et en ordonnée les différentes actions, pour bien montrer les différences de dynamique d'influence entre les actions et entre les variantes.

Cependant, sur le long terme, la différence de sensibilité entre les deux variantes pour les actions relatives aux volets se révèle moins significative grâce à l'indicateur d'échauffement global (Figure 4.6b). En effet, les indicateurs d'échauffement global ne sont que faiblement différents ce qui traduit des phénomènes plus impactants en intensité pour la variante ITI mais moins persistants que pour la variante ITE.

4.2. Comparaison de deux variantes d'un bâtiment : impact de l'inertie

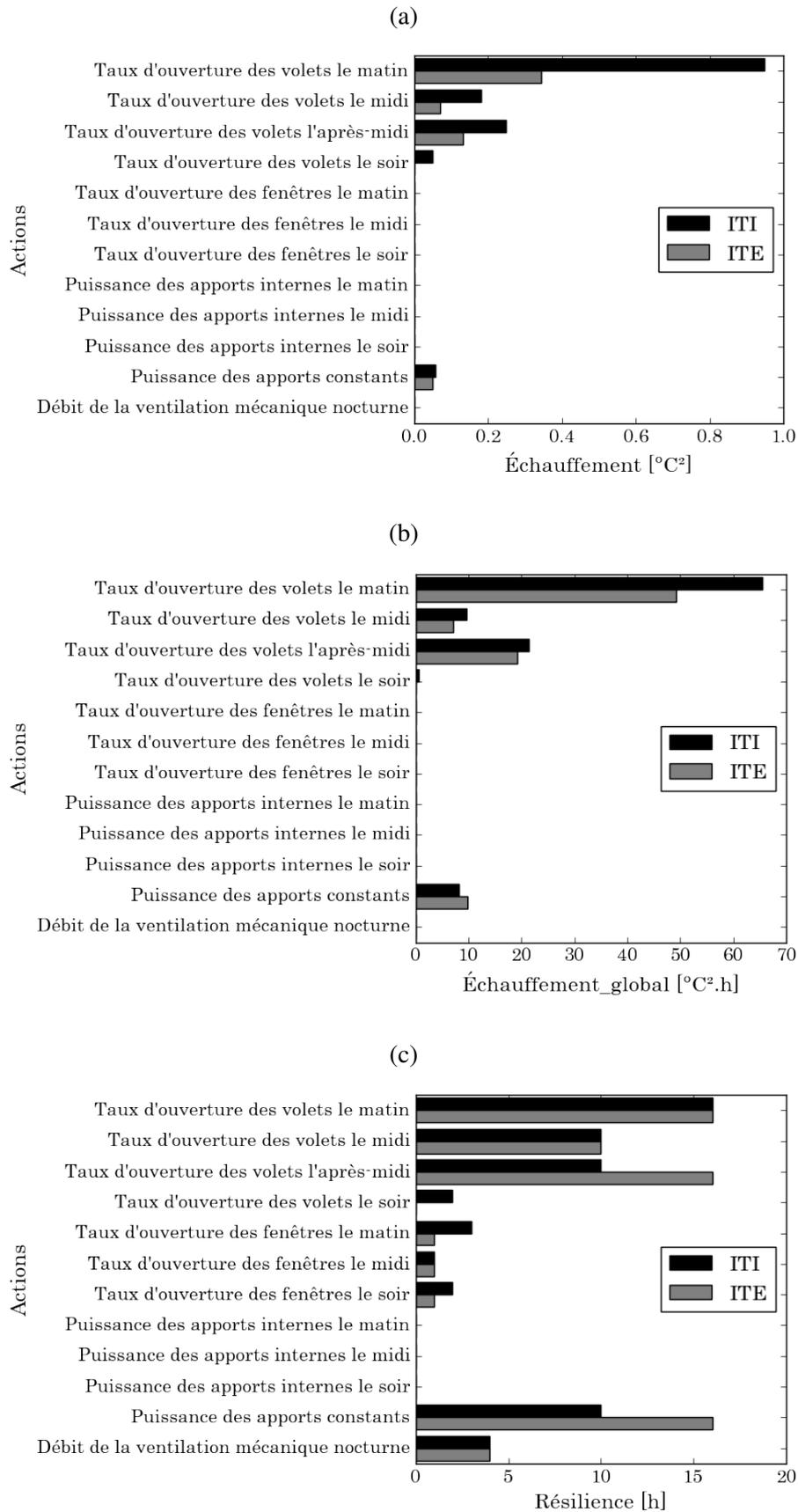


Figure 4.6 – Comparaison des indicateurs a) d'échauffement, b) d'échauffement global et c) de résilience dans la zone de jour

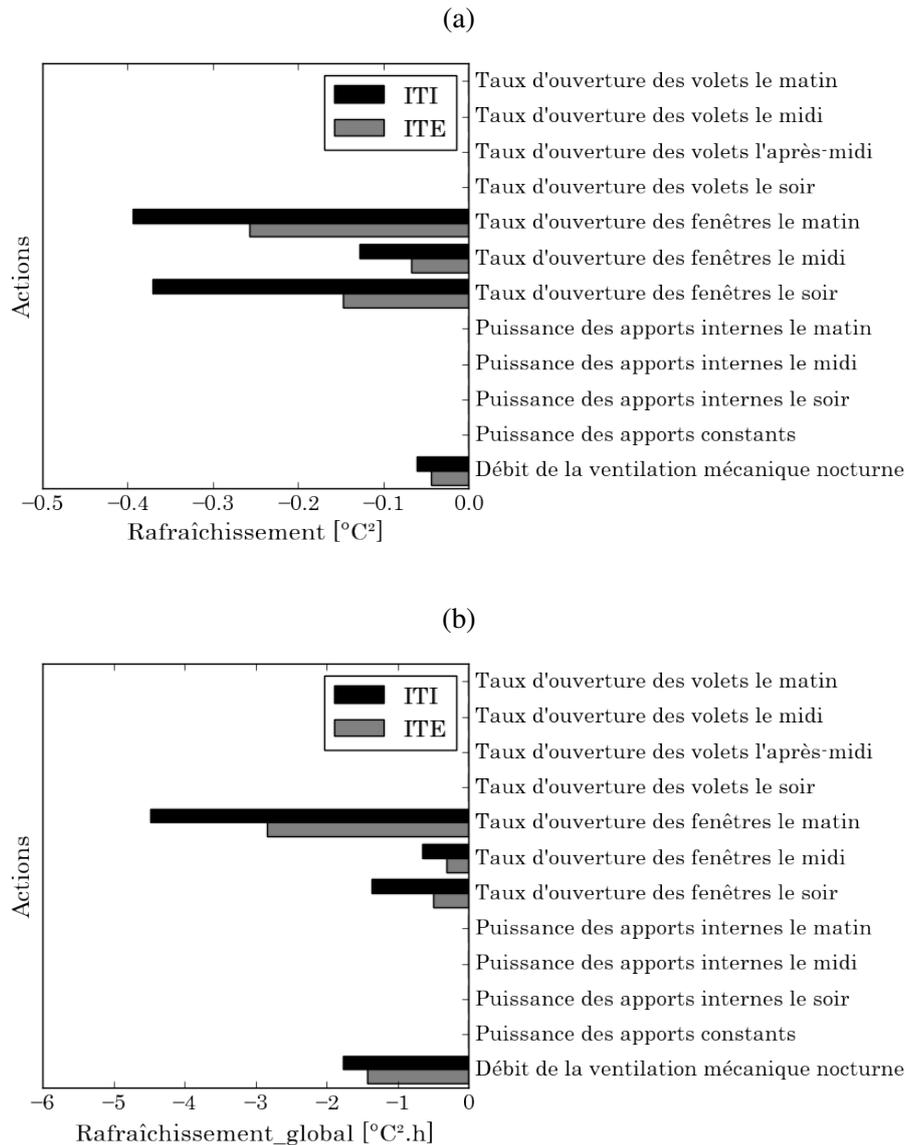


Figure 4.7 – Comparaison des indicateurs a) de rafraîchissement et b) de rafraîchissement global dans la zone de jour

Ainsi, l'inertie de la variante ITE permet d'amortir les effets des actions à un instant donné mais sur le long terme, l'influence de l'action regardée est soit plus longue dans le temps et ou soit plus forte sur d'autres instants que pour la variante ITI.

L'indicateur de résilience permet de comparer les durées maximales d'influence de chaque action pour chaque variante. Pour une étude sur la journée de 7h à 22h inclus, la résilience d'une action est donc limitée à 16 heures. Pour la variante ITE, les actions tendant à faire augmenter la température ont une influence plus longue ou équivalente à celle calculée pour la variante ITI (Figure 4.6c).

L'inverse est observé pour les actions tendant à faire baisser la température, identifiées

grâce aux indicateurs de rafraîchissement et de rafraîchissement global sur les Figures 4.7a et 4.7b, pour lesquelles le calcul de l'indicateur de résilience montre que leurs effets sont plus longs dans la durée pour la variante ITI. La variante ITE bénéficie donc moins longtemps des effets rafraîchissants des actions en jeu.

Ces valeurs d'indicateurs sont cohérentes avec les résultats obtenus pour les indicateurs de rafraîchissement et de rafraîchissement global permettant de conclure que les actions tendant à baisser la température ont plus d'effet à court (Figure 4.7a) et à long terme (Figure 4.7b) sur la variante ITI que sur la variante ITE. Cependant, en comparant les ordres de grandeurs de ces deux derniers indicateurs avec les ordres de grandeurs des indicateurs d'échauffement et d'échauffement global, les différences d'échelles sont significatives, les valeurs de l'indicateur de rafraîchissement global sont 10 fois moins élevées, en valeur absolue, que les indicateurs d'échauffement global.

En résumé, dans la zone séjour-cuisine et sur les heures de journée, les indicateurs calculés montrent que la variante ITE résiste mieux aux actions entraînant une hausse de la température, aussi bien sur une courte période que sur une longue période en comparaison avec la variante ITI. Mais elle bénéficie moins bien que la variante ITI du potentiel de rafraîchissement permis par différentes actions. Cependant, il faut retenir que pour les deux variantes, le potentiel de rafraîchissement est faible en comparaison avec le risque de surchauffe ce qui permet de relativiser les meilleurs résultats obtenus par la variante ITI par rapport à la variante ITE sur ce point.

4.2.4 Résultats obtenus pour la zone de nuit

Étude des courbes enveloppes

L'étude porte ici sur une des chambres, plus particulièrement la chambre 1 qui se situe à l'étage et au sud (Figure 3.2b). L'étude de l'amplitude et du positionnement des deux courbes enveloppes permet de mieux visualiser les différences de profils de température obtenus. Elle montre une différence de la réponse thermique des deux variantes ITE et ITI obtenue dans la chambre. Des profils de température plus chauds peuvent être obtenus dans la variante ITI par rapport à la variante ITE et rarement des températures plus basses.

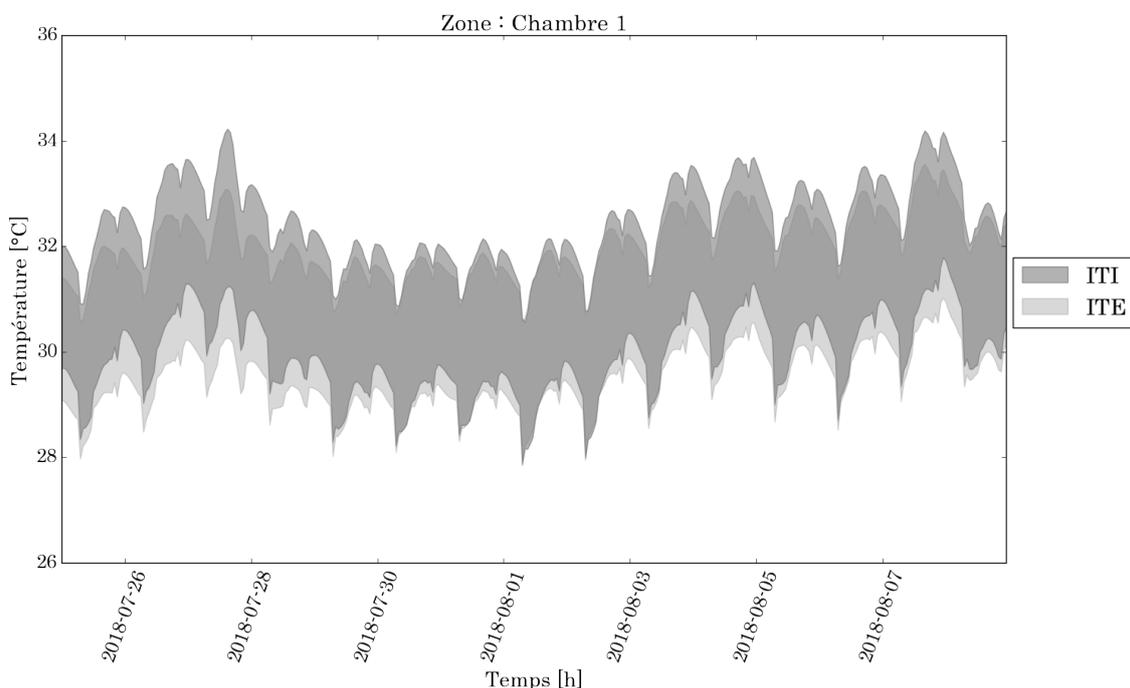


Figure 4.8 – Évolution des courbes enveloppes des profils de température obtenus dans la zone de nuit pour chacune des variantes, la couleur la plus foncée représente la superposition des courbes enveloppes

Les écarts de dynamique et d'amplitude d'évolution de ces deux courbes sont faibles comparés à ceux observés dans la zone séjour-cuisine. Cela peut être expliqué par l'absence de changement entre les deux modèles de l'inertie du plancher de cette zone. Entre les deux variantes et dans les zones situées à l'étage du bâtiment modélisé, seul l'emplacement de l'isolation des murs extérieurs est modifié entre les variantes.

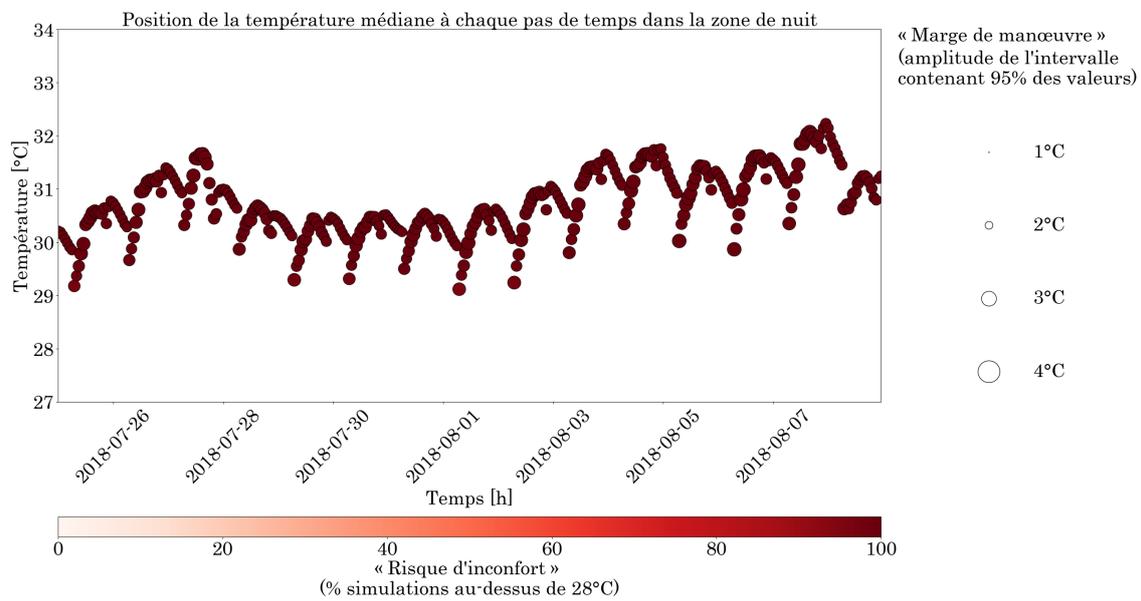
Au vu des courbes enveloppes, le potentiel de rafraîchissement est faible pour les deux variantes ce qui sera vérifié dans l'étude des risques et de la marge de manœuvre.

Étude des risques et marge de manœuvre

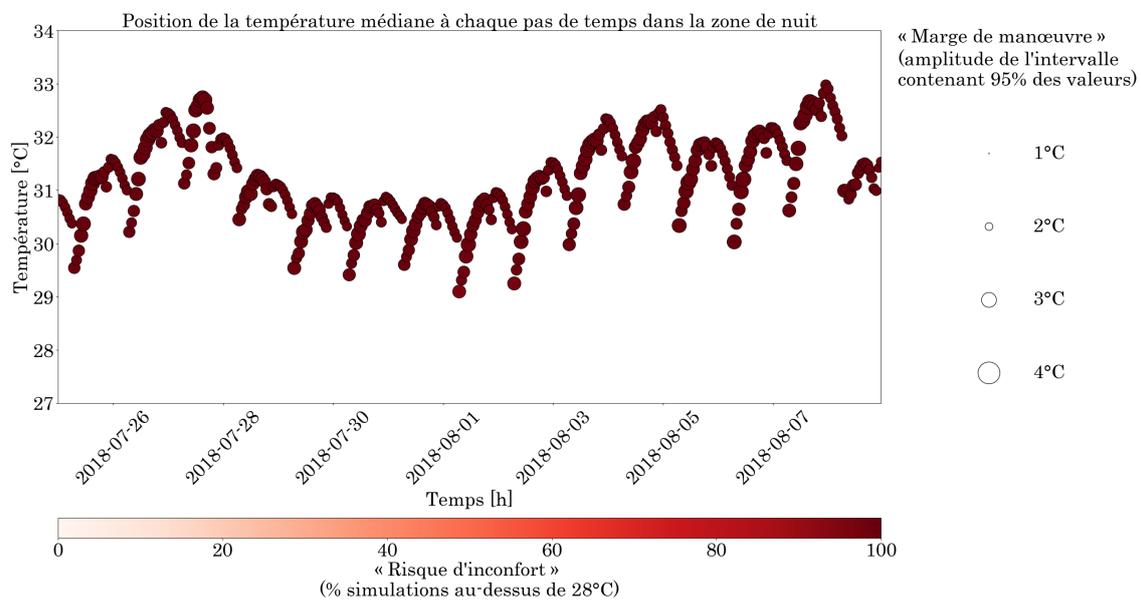
On observe peu de différences sur les courbes représentant les risques et la marge de ma-

nœuvre possible sur la température opérative dans cette zone pour les deux variantes (Figure 4.9).

À la différence de la zone séjour-cuisine, aucune des variantes ne présente de risque d'inconfort ou une marge de manœuvre clairement plus faible ou plus élevée que l'autre. Les études suivantes, réalisées avec l'analyse de sensibilité, doivent donc montrer peu de différences d'influence des actions sur la réponse thermique des deux variantes. Le risque d'inconfort étant supérieur à 80% dans les variantes sur l'ensemble de la période d'étude, le potentiel de rafraîchissement des actions calculé sera, a priori, faible.



(a) ITE



(b) ITI

Figure 4.9 – Étude des risques et de la marge de manœuvre possible pour les deux variantes dans la zone de nuit

Analyse de sensibilité temporelle

Dans les zones de nuit, on ne s'intéresse qu'à l'étude de l'influence des différentes actions sur les heures de nuit de 22h à 7h. Le reste du temps, les variances partielles signées sont forcées à zéro.

Seulement 5 des 12 actions testées ont une influence sur la réponse thermique de l'une ou des deux variantes du bâtiment et donc seules les 5 courbes de variances partielles ont été tracées sur la Figure 4.10. La nuit, on observe que l'influence du taux d'ouverture des volets le matin est encore visible sur les deux courbes de variances partielles associées à cette action et si quelquefois le pic d'influence est supérieur dans la variante ITI, on observe plus facilement une variance partielle plus élevée pour la variante ITE. Les variances partielles calculées pour le débit de la ventilation mécanique nocturne montre que l'influence de cette action est similaire en termes de dynamique pour les deux variantes, seule l'intensité de cette influence varie et est plus faible pour la variante ITE.

Pour les autres actions, les variances partielles calculées sont quasi égales entre la variante ITI et ITE. Les indicateurs doivent alors refléter les similitudes de comportement des deux bâtiments.

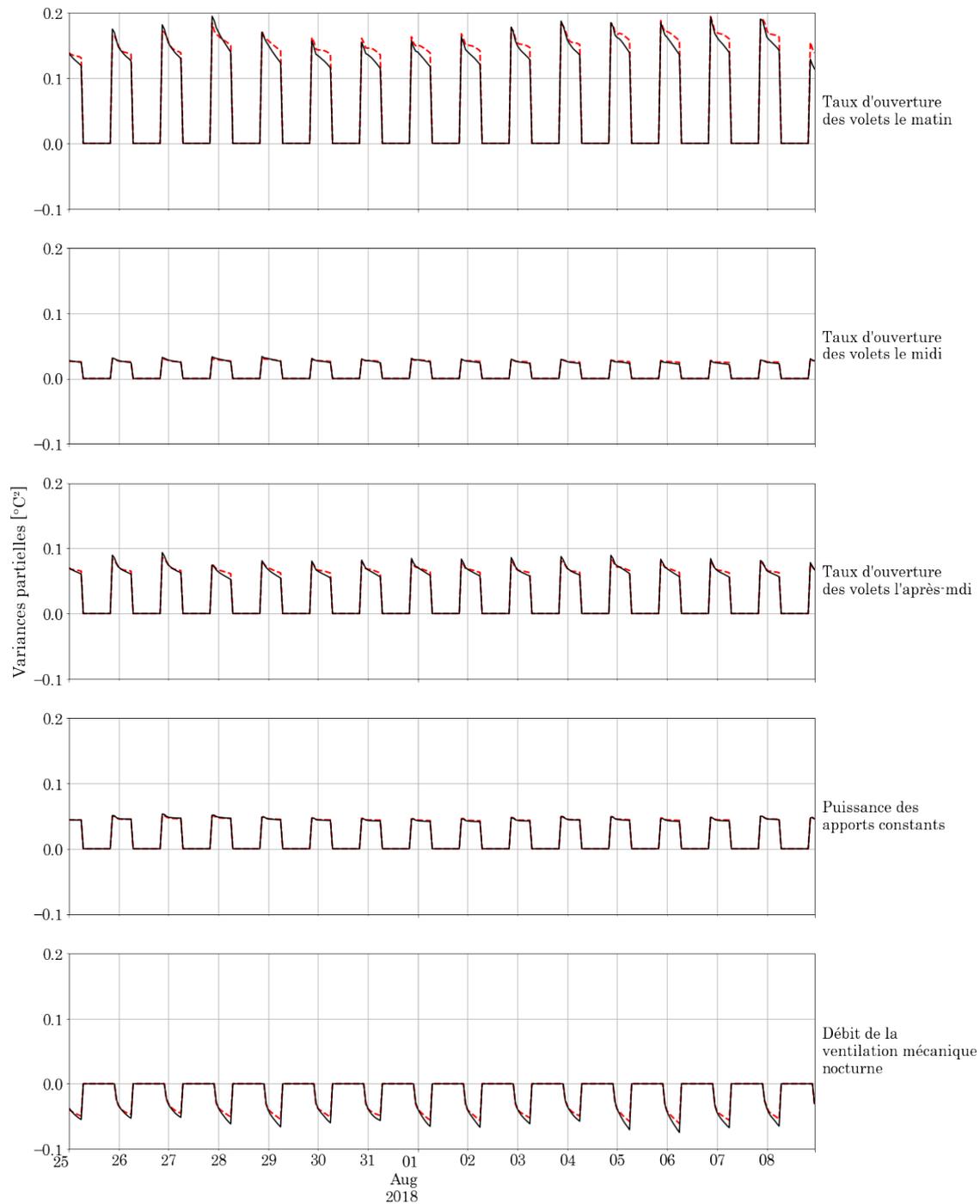


Figure 4.10 – Évolution des variances partielles signées pour les 5 actions testées influentes sur la période allant du 25 juillet au 9 août dans la chambre 1 sur les heures de nuit de 22h à 7h pour la variante ITI (en noir) et la variante ITE (en rouge)

Comparaison des indicateurs

La comparaison de l'ensemble des indicateurs entre les deux variantes confirme à nouveau que les différentes actions testées ont une influence sur les réponses thermiques des deux bâtiments quasi identique dans la chambre 1 la nuit. Les indicateurs ont été tracés avec les mêmes échelles que la zone séjour-cuisine.

Tout d'abord, pour une étude sur la nuit de 22h à 7h inclus, la résilience d'une action est donc limitée à la durée de l'étude c'est à dire 10 heures. Les valeurs de l'indicateur de résilience pour toutes les actions sont identiques entre les deux variantes (Figure 4.11c) montrant alors les faibles différences de dynamique entre les deux réponses des bâtiments face aux actions.

De plus, l'indicateur d'échauffement pour les actions tendant à faire augmenter la température est faiblement supérieur pour la variante ITI par rapport à la variante ITE (Figure 4.11a). Mais dans cette zone, les effets sur le long terme sont inversés, l'influence de ces actions est plus forte dans la variante ITE que dans la variante ITI (Figure 4.11b). Ainsi, l'inertie de la variante ITE permet d'amortir les effets des actions à un instant donné mais sur le long terme, l'influence de l'action regardée est soit plus longue dans le temps soit plus forte sur d'autres instants que pour la variante ITI ce qui conduit à des valeurs d'échauffement global supérieur pour cette variante. Sur la globalité des heures de nuit, le taux d'ouverture des volets, aux différents moments de la journée est donc plus influent dans la variante ITE.

Le potentiel de rafraîchissement est comme dans le séjour-cuisine 3 fois plus élevé que les risques d'échauffement. Les indicateurs de rafraîchissement (Figure 4.12a) et de rafraîchissement global (Figure 4.12b) révèlent que seul le débit de surventilation nocturne a une influence sur la température opérative et tend à faire diminuer la température de la zone concernée. Aussi bien sur une courte période que sur le long terme, la variante ITI bénéficie plus du potentiel de rafraîchissement de cette action que la variante ITE. Pour l'échauffement, les deux variantes sont très comparables.

En résumé, dans la chambre 1 et sur les heures de nuit, les indicateurs calculés montrent que la variante ITI est plus robuste sur l'ensemble des nuits aux actions des occupants tendant à faire augmenter la température et bénéficie mieux du potentiel de rafraîchissement des différentes actions.

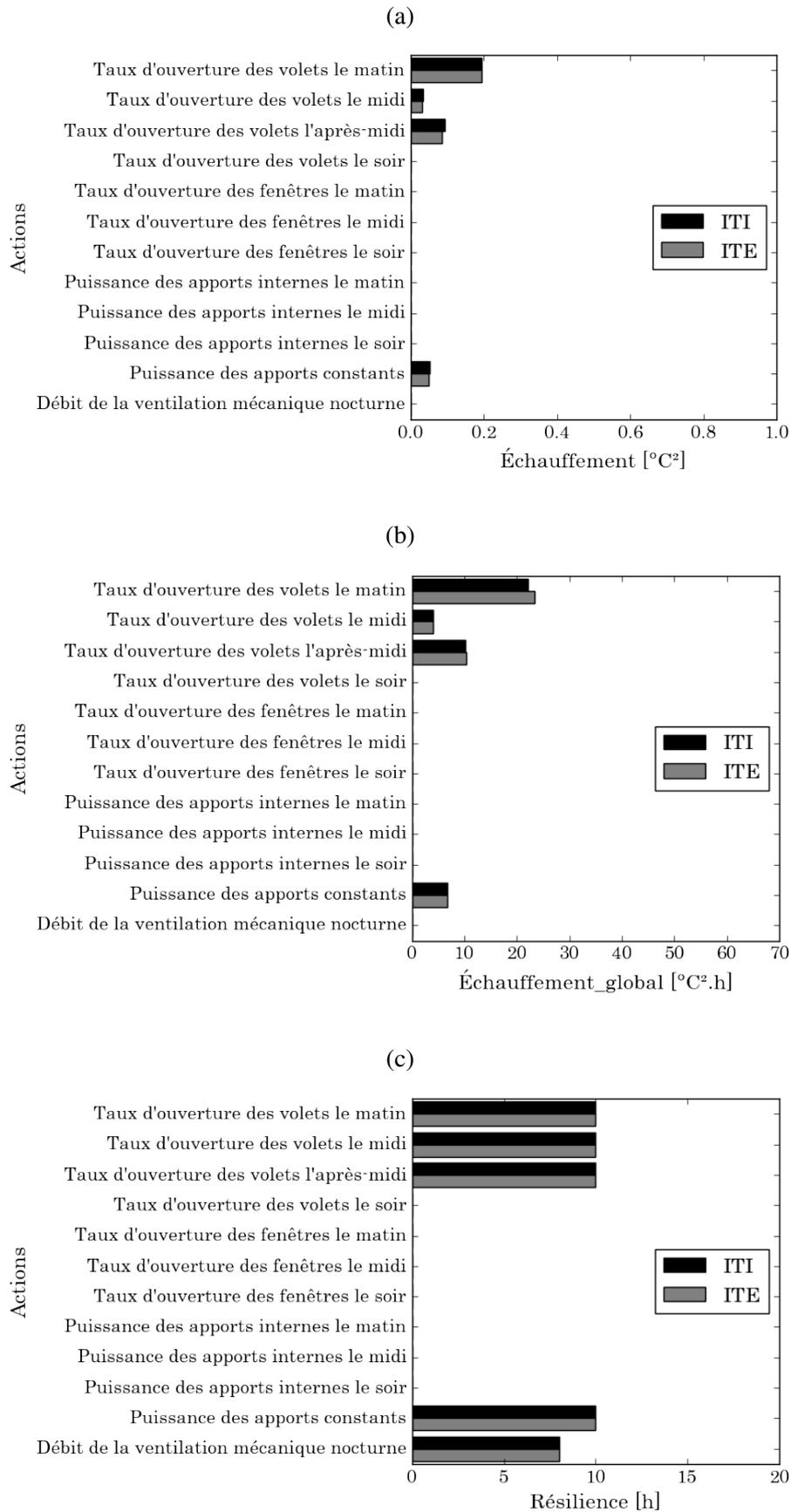


Figure 4.11 – Comparaison des indicateurs a) d'échauffement, b) d'échauffement global et c) de résilience dans la zone de nuit

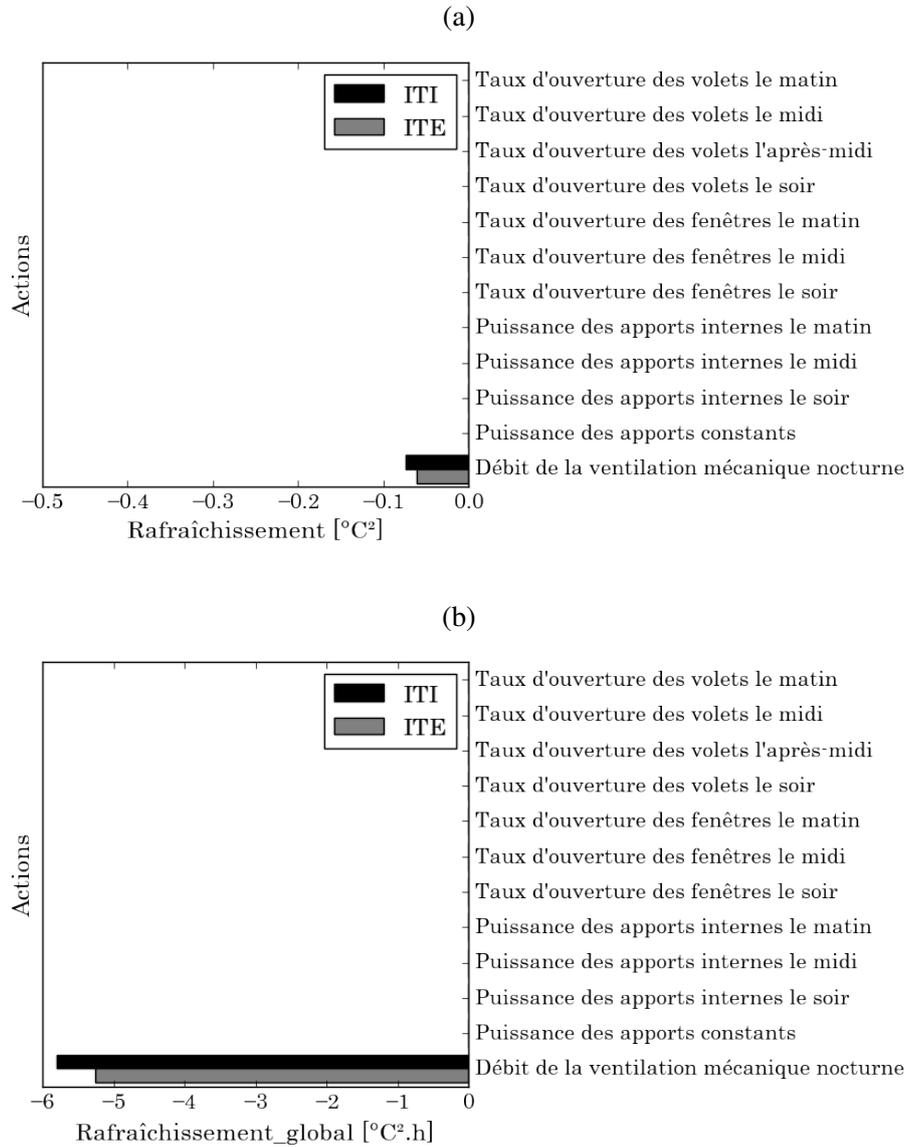


Figure 4.12 – Comparaison des indicateurs a) de rafraîchissement et b) de rafraîchissement global dans la zone de nuit

4.2.5 Conclusion de l'étude

La comparaison de la robustesse de différentes conceptions d'un bâtiment à des combinaisons d'actions possibles des occupants a été faite. La comparaison de l'évolution des profils de température, de l'étude des risques et de la marge de manœuvre possible au cours du temps montrent que la variante ITI est une variante de conception du bâtiment plus risquée que la variante ITE car moins robuste aux actions des occupants. Le confort dans la variante ITI peut cependant être meilleur, c'est à dire que des combinaisons d'actions entraînent des températures en dessous des valeurs atteintes par la variante ITE. Ainsi, une variante robuste aux actions des habitants n'est pas forcément le choix qui conduit à un meilleur confort en fonction du mode de vie des habitants. Les indicateurs sont alors particulièrement adaptés pour comprendre et comparer l'influence des actions des occupants sur la réponse thermique de chaque variante.

Les indicateurs d'échauffement, d'échauffement global, de rafraîchissement, de rafraîchissement global et de résilience sont cohérents entre les deux variantes étudiées. Ils reflètent pour chaque variante et dans chaque zone, l'intensité et la persistance avec lesquelles une action influence la température opérative et permettent ici de positionner chacune des variantes par rapport à sa capacité à limiter la hausse de la température induite par une action et sa capacité à bénéficier du rafraîchissement induit par une autre.

Dans l'étude réalisée, les indicateurs servent à quantifier ce que l'on pressent. La variante du bâtiment avec le plus d'inertie, la variante ITE, est plus robuste aux actions des occupants que la variante à faible inertie. D'une part, l'inertie du bâtiment permet d'amortir l'impact des actions (sources de chaleur) en intensité. Par exemple, l'échauffement à court terme dû à l'action relative à l'ouverture des volets le matin est 2,5 fois moins élevé dans le séjour-cuisine pour la variante ITE par rapport à la variante ITI. D'autre part, ces actions ont une influence qui est plus persistante sur la durée par la présence de cette même inertie par rapport à une variante à plus faible inertie.

Dans cette étude, on a observé que le potentiel de rafraîchissement était limité dans les deux variantes c'est à dire que les actions testées ne permettent pas de faire diminuer significativement la température. Bien sûr, la ventilation mécanique nocturne permet de faire diminuer la température intérieure, mais l'action de l'occupant sur le système de ventilation permettant de modifier le débit entre 90 à 150 m^3/h a, par contre, peu d'influence sur la température.

Ce manque de potentiel de rafraîchissement amène à tester une configuration permettant de faire intervenir la ventilation naturelle, également recommandée pour faire

diminuer la température intérieure dans un bâtiment. On cherche alors à étudier, grâce à la méthodologie, comment réagit chaque variante de conception lorsque l'on introduit des actions relatives à cette nouvelle gestion de la ventilation.

4.3 Comparaison de deux modes de gestion : pertinence du recours à la ventilation naturelle nocturne

4.3.1 Objectif et contexte de l'étude

Pour améliorer le confort thermique dans un bâtiment en période estivale, plutôt que de mettre en place des solutions techniques qui peuvent être coûteuses à l'achat, à l'installation et en phase utilisation, il peut être intéressant de proposer aux habitants des actions adaptées.

Dans cette étude, on va s'intéresser à l'influence de la ventilation naturelle nocturne par ouverture des portes intérieures et des fenêtres sur le rafraîchissement de chacune des variantes précédemment étudiée pour lesquelles un faible impact de la ventilation mécanique nocturne a été observé. L'objectif étant de comparer le potentiel de rafraîchissement de la ventilation naturelle au potentiel de rafraîchissement de la ventilation mécanique nocturne. Puisque ces deux configurations de ventilation sont dépendantes des actions des habitants, on cherchera également à évaluer la sensibilité de chaque mode de ventilation aux actions des habitants.

4.3.2 Démarche employée

Dans cette étude, deux nouvelles actions sont introduites dans le jeu d'actions déjà testé. Les deux nouvelles actions sont relatives au taux d'ouverture des portes intérieures la nuit et au taux d'ouverture des fenêtres la nuit. Les débits d'air déterminés par le module aéraulique du modèle numérique sont dépendants des surfaces d'ouverture entre l'intérieur et l'extérieur, donc des taux d'ouverture des fenêtres et des surfaces d'ouverture inter-zones (taux d'ouverture des portes intérieures). Le principe de fonctionnement du modèle aéraulique a déjà été présenté dans la partie 3.2.2. Tout comme les autres actions, les plages de variation associées à ces actions se trouvent dans la plage de fonctionnement des éléments sur lesquels les actions agissent soit un taux d'ouverture des portes et des fenêtres compris entre 0% et 100%.

L'étude a été réalisée pour la variante ITE et la variante ITI du bâtiment avec cette nouvelle configuration de la ventilation. Pour chaque étude, 1000 combinaisons d'actions ont été propagées dans le modèle concerné et sont obtenues par l'échantillonnage LHS dont les entrées sont résumées dans le Tableau 4.2. En tout, 14 actions sont représentées (dont deux « nouvelles ») permettant de conclure sur l'influence d'une action en tenant compte de la variabilité du comportement des habitants au cours d'une journée.

Pour chaque étude, les courbes enveloppes, le risque d'inconfort et la marge de manœuvre induits par la variabilité des actions des occupants testées sont évalués. Les indicateurs reflètent les évolutions des variances partielles signées de chaque action qui ne sont donc plus présentées mais sont disponibles en Annexe B.

Tableau 4.2 – Liste des actions et de leur plage de fonctionnement pour générer les 1000 échantillons

Actions	Plage horaire	Distribution	Min.	Max.
1 - Ouverture des fenêtres le matin	7h - 7h10	Uniforme	0%	100%
2 - Ouverture des fenêtres le midi	12h - 12h10	Uniforme	0%	100%
3 - Ouverture des fenêtres le soir	20h - 20h10	Uniforme	0%	100%
4 - Ouverture des volets le matin	8h - 12h	Uniforme	0%	100%
5 - Ouverture des volets le midi	12h - 14h	Uniforme	0%	100%
6 - Ouverture des volets l'après-midi	14h - 18h	Uniforme	0%	100%
7 - Ouverture des volets le soir	18h - 21h	Uniforme	0%	100%
8 - Utilisation d'équipements le matin	7h - 8h	Uniforme	2.3 [W/m ²]	6.9 [W/m ²]
9 - Utilisation d'équipements le midi	12h - 13h	Uniforme	2.3 [W/m ²]	6.9 [W/m ²]
10 - Utilisation d'équipements le soir	20h - 21h	Uniforme	2.3 [W/m ²]	6.9 [W/m ²]
11 - Fonctionnement d'équipements en mode veille	24h / 24	Uniforme	0.55 [W/m ²]	1.65 [W/m ²]
12 - Utilisation de la surventilation mécanique nocturne	22h - 7h	Uniforme	90 [m ³ /h]	150 [m ³ /h]
13 - Ouverture des portes intérieures la nuit	22h - 7h	Uniforme	0%	100%
14 - Ouverture des fenêtres la nuit	22h - 7h	Uniforme	0%	100%

Avec une simulation où les fenêtres sont entièrement ouvertes et les portes intérieures fermées la nuit, le débit moyen de renouvellement d'air engendré durant la nuit est de 13 vol/h dans le séjour-cuisine sur la période allant du 25 juillet au 09 août. Il est de 10 vol/h dans la chambre 1. La ventilation mécanique quant à elle permet un renouvellement d'air de 0,5 vol/h (90 m³/h) en fonctionnement de base. En débit de pointe, l'équipement peut fournir jusqu'à 150 m³/h soit un renouvellement d'air de 0,9 vol/h. Les débits en jeu avec la ventilation naturelle sont bien supérieurs. Ce changement de gestion de la ventilation va donc avoir un impact certain sur la réponse thermique du bâtiment : les indicateurs et les graphiques de diagnostique vont permettre de quantifier cet impact et le changement de sensibilité vis à vis des actions des occupants.

4.3.3 Résultats obtenus pour la zone jour

Étude des courbes enveloppes

Après l'introduction de deux nouvelles actions, l'ouverture des portes intérieures la nuit et l'ouverture des fenêtres la nuit, des conclusions similaires à celles de l'étude réalisée sans la ventilation naturelle peuvent être faites. En observant l'évolution des courbes enveloppes de chacune des variantes (Figure 4.13), on retrouve que la variante ITI permet d'obtenir des températures cette fois-ci, légèrement plus basses sur certaines nuits que la variante ITE et des températures en journée bien plus élevées dans le séjour-cuisine.

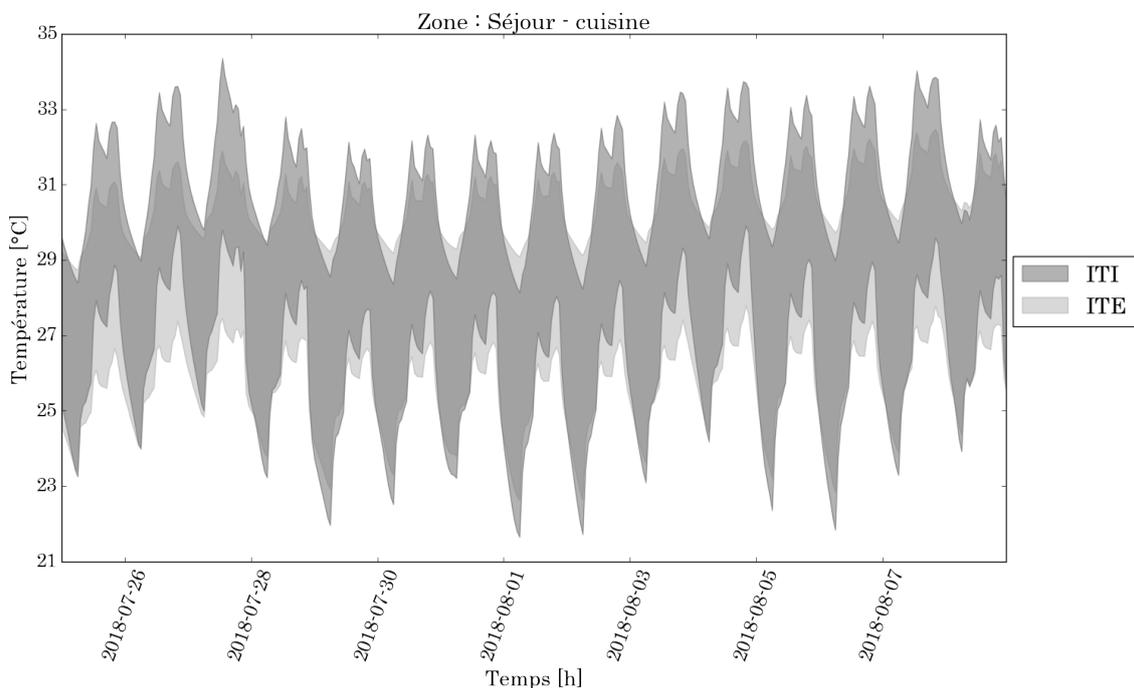


Figure 4.13 – Évolution des courbes enveloppes des profils de température obtenus dans la zone de jour pour chacune des variantes, la couleur la plus foncée représente la superposition des courbes enveloppes

Cependant, les échelles de température diffèrent : ici, la température la plus basse obtenue la nuit par la variante ITI sur la période d'étude est aux alentours de 22°C alors qu'elle est de l'ordre de 27°C dans la configuration précédente. Pour la variante ITE, cette température est maintenant aux alentours de 23°C contre 28°C auparavant. Ces différences sont moins significatives pour les températures les plus hautes qui sont atteintes en journée, les valeurs maximales sont réduites d'environ 1°C dans chaque variante par rapport à l'étude sans recours à la ventilation naturelle.

Pour mieux observer les différences entre les deux modes de ventilation sur la dispersion des valeurs de température horaire et le confort dans le bâtiment, le risque de

surchauffe et la marge de manœuvre sont tracés pour chaque heure.

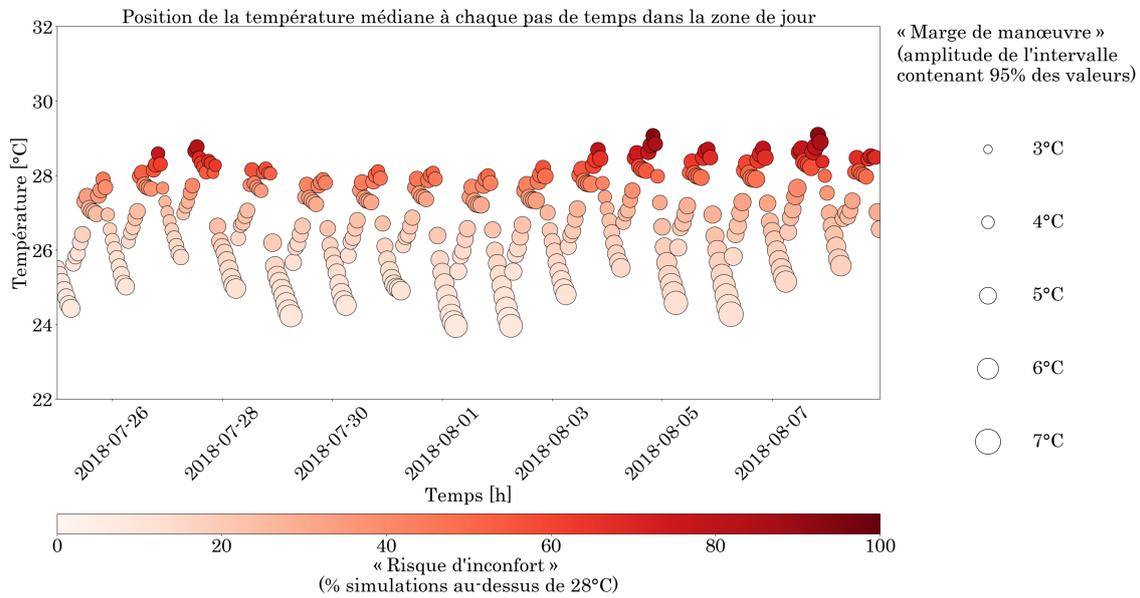
Étude des risques et marge de manœuvre

Avec les 1000 profils de combinaisons d'actions propagées dans le modèle, on observe en premier lieu que la température médiane ne dépasse pas les 30°C dans la variante ITE (4.14a) et 32°C dans la variante ITI (4.14b). De plus, le risque d'inconfort dépasse les 50% uniquement sur quelques heures de la période d'étude dans la variante ITE. Pour la variante ITI, le risque d'inconfort reste élevé sur de nombreuses heures.

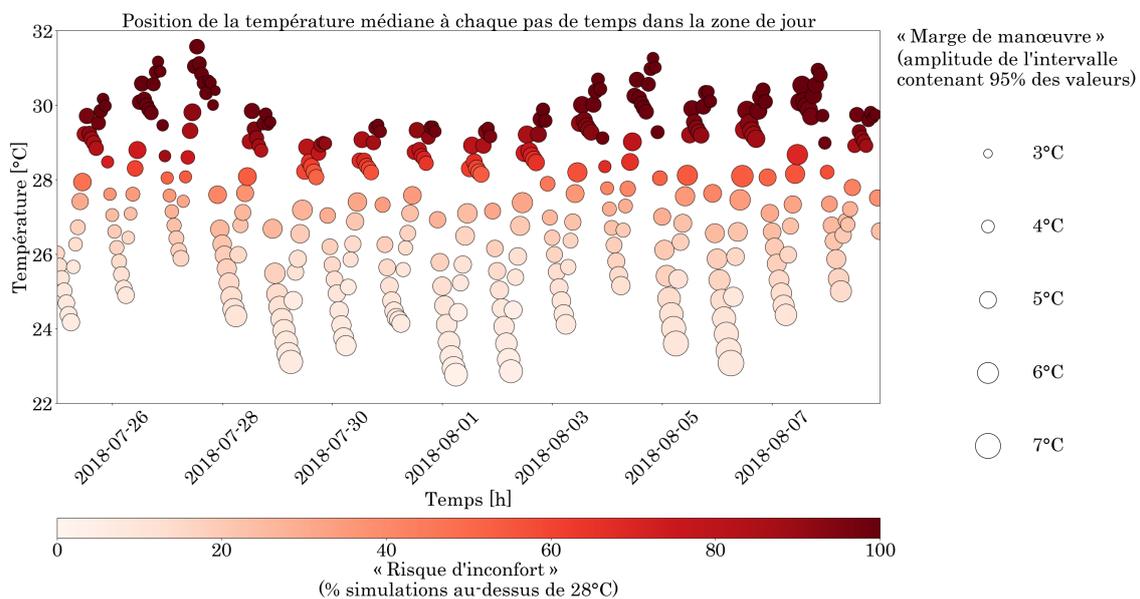
On observe également une nette différence de dispersion des valeurs de température. Sans intervention de la ventilation naturelle, la variante ITI était celle qui permettait une plus large marge de manœuvre sur la température avec une valeur maximale de 4°C. Avec la ventilation naturelle, les deux variantes ITI et ITE connaissent une dispersion maximale des températures d'au moins 6°C. La dispersion de la température n'est que de 3°C avec la variante ITI pour les heures où le risque d'inconfort est élevé.

L'étude des indicateurs calculés dans le séjour-cuisine en journée permet de quantifier et de comparer l'intensité et la persistance de l'influence des différentes actions. On s'intéresse particulièrement aux valeurs des indicateurs des actions relatives aux différents modes de ventilation.

4.3. Comparaison de deux modes de gestion : pertinence du recours à la ventilation naturelle nocturne



(a) ITE



(b) ITI

Figure 4.14 – Étude des risques et de la marge de manœuvre possible avec 14 actions testées dans la zone de jour pour les deux variantes

Étude des indicateurs

Les indicateurs ont été tracés sur le même histogramme pour les variantes ITE et ITI pour chacune des 14 actions. On rappelle que deux critères ont été appliqués aux valeurs de variances partielles signées avant de parvenir au calcul des indicateurs :

- la variance totale V calculée au pas de temps t doit être supérieure à $0,06^{\circ}C^2$ ce qui correspond à un écart relatif minimal σ de $0,25^{\circ}C$
- et l'indice de sensibilité du premier ordre associé à une action doit être supérieur à 5%.

La comparaison des courbes de variances partielles signées des actions influentes se trouvent en Annexe B.

Quand les occupants peuvent influencer sur la ventilation naturelle, les indicateurs d'échauffement (Figure 4.15a) et d'échauffement global (Figure 4.15b) montrent, dans la variante ITE, que seule l'action relative au taux d'ouverture des volets le matin tend à faire augmenter la température en journée dans le séjour-cuisine. Cette variante est plus robuste aux actions des occupants que la variante ITI si l'on compare les valeurs des indicateurs d'échauffement global des deux variantes dans le séjour-cuisine en journée. Lorsque l'on compare les indicateurs de résilience (Figure 4.15c) avec ceux obtenus pour l'étude sans ventilation naturelle, on remarque également une nette différence entre les deux études. Pour les deux variantes, la persistance des actions tendant à faire augmenter la température est plus faible que la valeur maximale qui est de 16 heures (à l'exception de l'action sur le taux d'ouverture des volets le matin pour la variante ITE).

Quand les occupants peuvent influencer sur la ventilation naturelle, il y a un facteur de l'ordre de 100 d'écart sur l'impact des occupants sur le rafraîchissement du bâtiment comparé au seul mode de ventilation mécanique. Les indicateurs de rafraîchissement (Figure 4.16a) et de rafraîchissement global (Figure 4.16b) montrent un effet prédominant sur la température de l'action relative au taux d'ouverture des fenêtres la nuit avec des valeurs d'indicateurs aux alentours de $300^{\circ}C^2.h$ pour les deux variantes alors que dans l'étude précédente, les indicateurs de rafraîchissement global étaient en dessous de $5^{\circ}C^2.h$.

L'action relative au taux d'ouverture des fenêtres la nuit influence donc la baisse de la température de façon intense et persistante alors que le choix du débit de surventilation nocturne n'a pas d'effet significatif sur la température lorsque cette action est possible. C'est la variante ITE qui bénéficie le plus, sur le long terme, du potentiel de rafraîchissement dans le salon induit par la ventilation naturelle en comparant les indicateurs de rafraîchissement global des deux variantes.

4.3. Comparaison de deux modes de gestion : pertinence du recours à la ventilation naturelle nocturne
naturelle nocturne

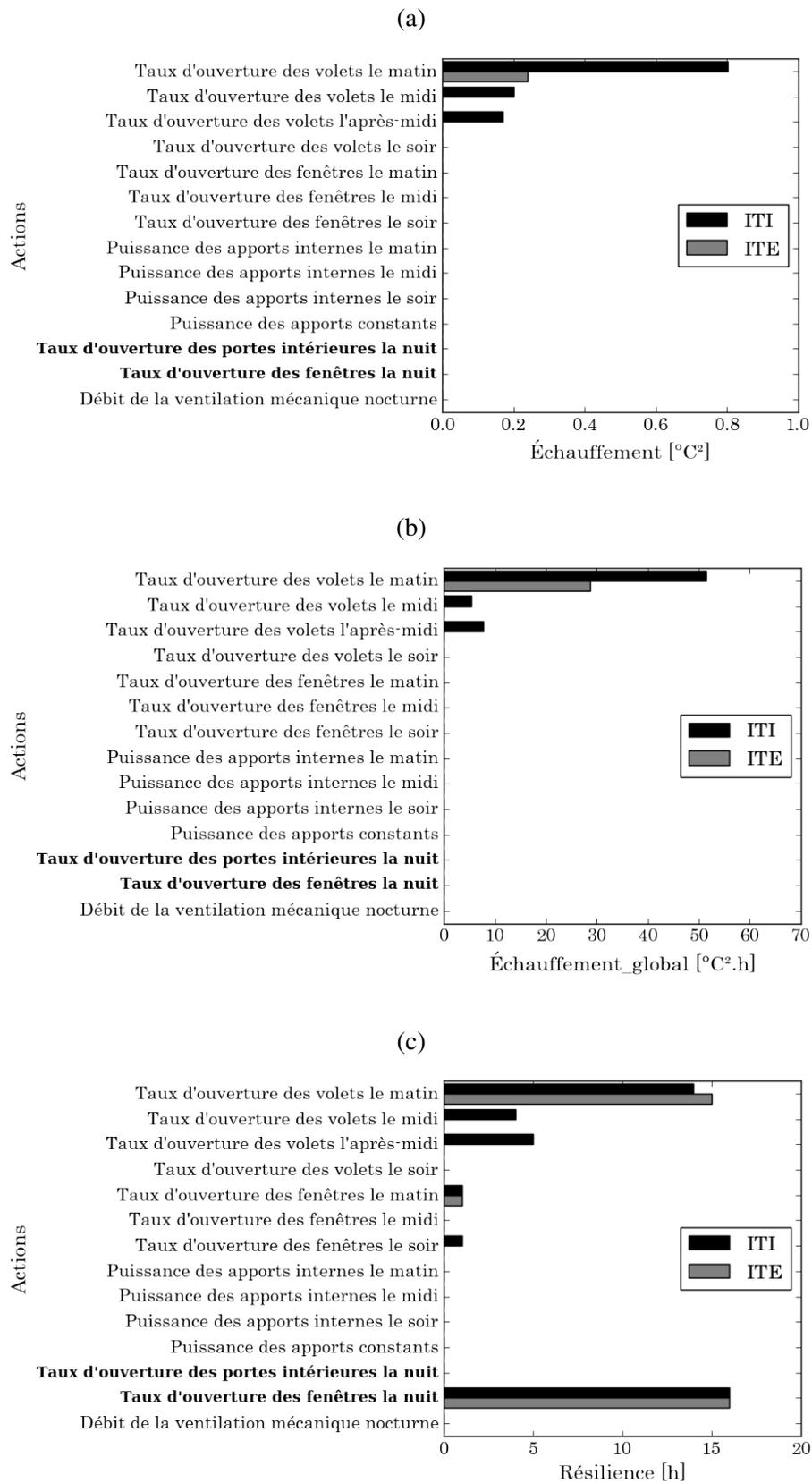


Figure 4.15 – Comparaison des indicateurs a) d'échauffement, b) d'échauffement global et c) de résilience dans le séjour-cuisine en journée

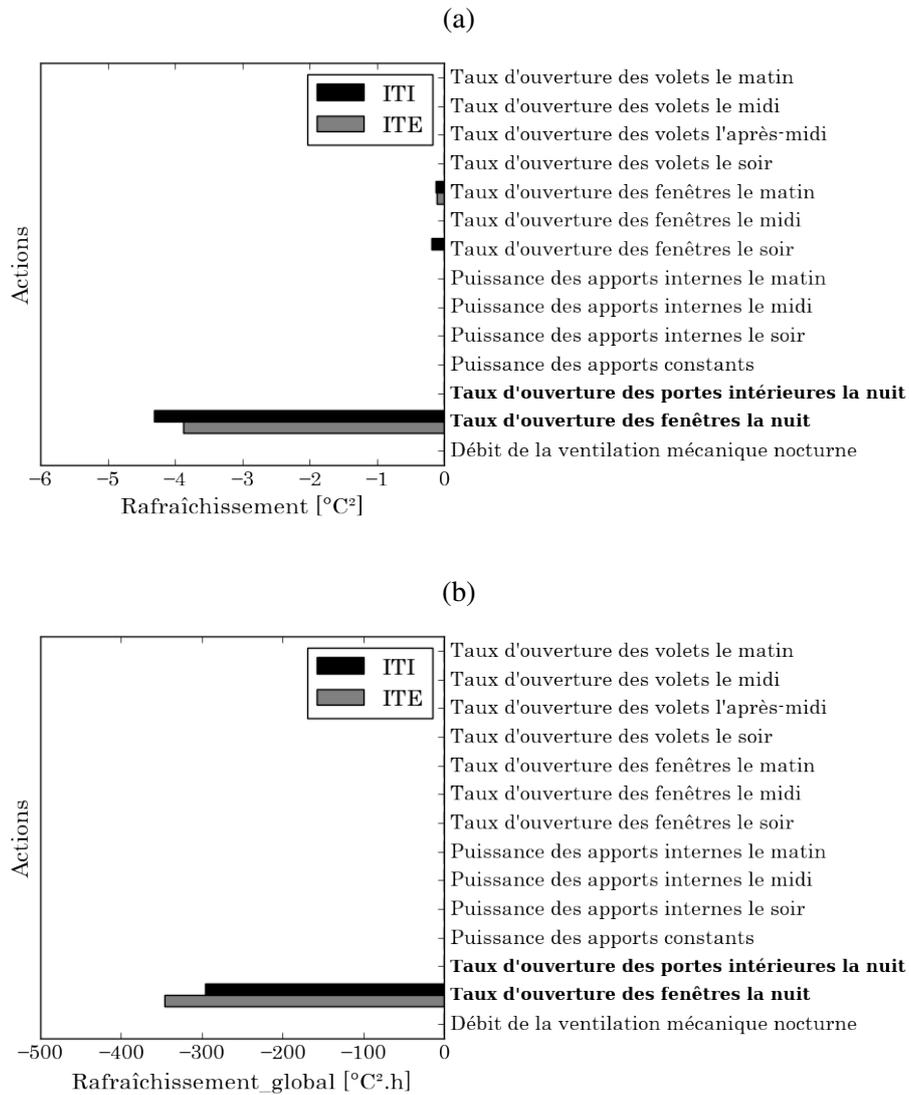


Figure 4.16 – Comparaison des indicateurs a) de rafraîchissement et b) de rafraîchissement global dans le séjour-cuisine en journée

L'action relative au taux d'ouverture des portes la nuit a obtenu des valeurs de rafraîchissement et de rafraîchissement global nulles pour le séjour-cuisine. Les effets du vent n'étant pas pris en compte dans le modèle, le tirage thermique entre les zones « salle de bains » et « séjour-cuisine » (par la porte visible sur le plan de la Figure 3.9a) ne suffit pas à influencer la température de cette zone de manière significative.

4.3.4 Résultats obtenus dans la zone nuit

Étude des courbes enveloppes

Dans la zone de nuit, on observe également peu de différences entre les formes des courbes enveloppes obtenues entre cette étude (Figure 4.17) et l'étude sans ventilation naturelle (Figure 4.8). La différence se trouve, comme dans la zone de jour, dans l'étendue des valeurs des profils de température. Pour les deux variantes, les valeurs maximales obtenues sont également diminuées de 1°C. Quant aux valeurs minimales, elles passent de 28°C sans la ventilation naturelle à 23°C. La réduction de l'inconfort par la ventilation naturelle est également visible sur les courbes présentant les risques d'inconfort (Figure 4.18).

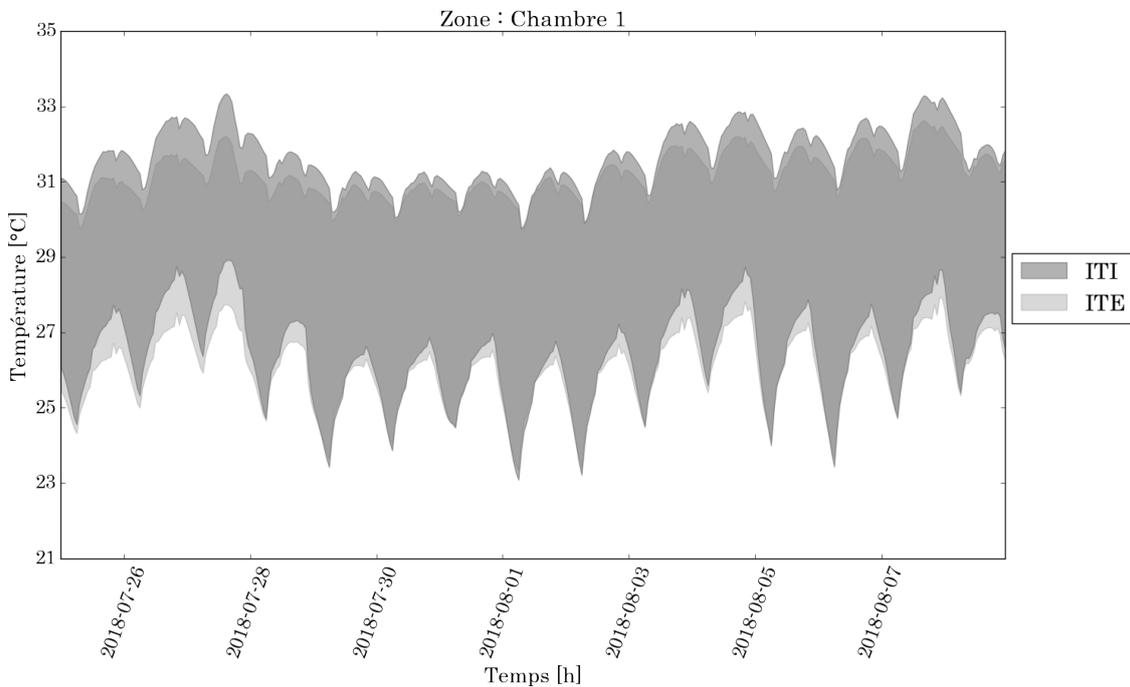
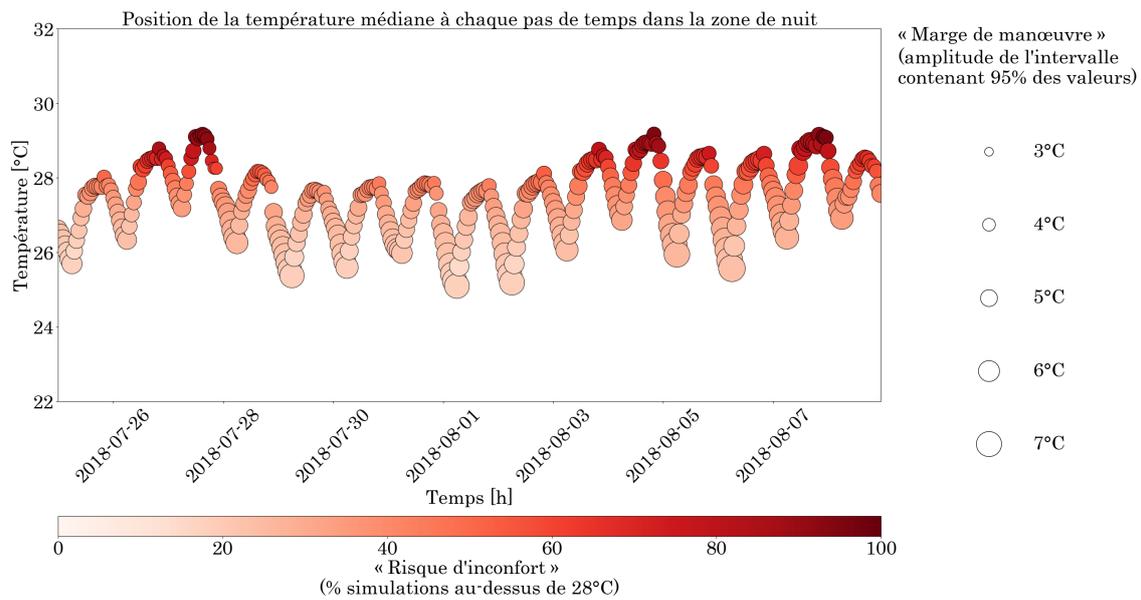


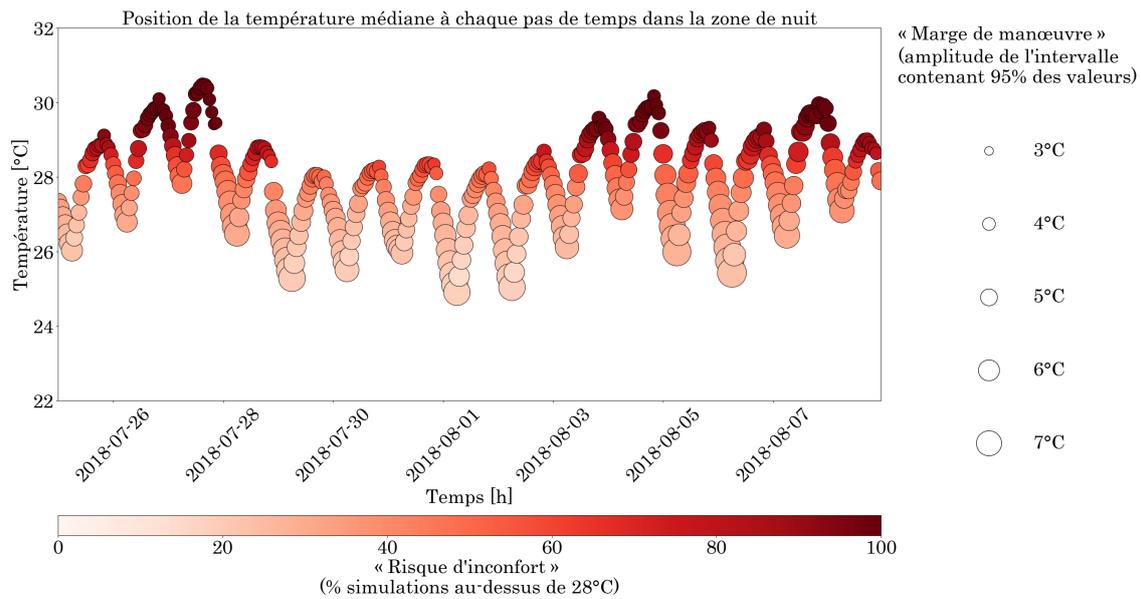
Figure 4.17 – Évolution des courbes enveloppes des profils de température obtenus dans la zone de nuit pour chacune des variantes, la couleur la plus foncée représente la superposition des courbes enveloppes

Étude des risques et marge de manœuvre

Dans la chambre 1, la nuit, le risque d'inconfort est plus présent par rapport au séjour-cuisine dans les deux variantes. Cependant, il est bien plus faible que l'étude sans ventilation naturelle, pour laquelle le risque d'inconfort dans la chambre 1 est toujours au-dessus de 80 % pour les deux variantes. Les marges de manœuvre sont dans cette zone également très larges et peuvent aller jusqu'à 7°C. Les températures médianes sont au maximum de 30 °C dans la variante ITE (Figure 4.18a) et de 31°C dans la variante ITI (Figure 4.18b) .



(a) ITE



(b) ITI

Figure 4.18 – Étude des risques et de la marge de manœuvre possible avec 14 actions testées dans la zone de nuit pour les deux variantes

Étude des indicateurs

La comparaison des courbes de variances partielles signées des actions influentes se trouvent en Annexe B.

En zone jour comme en zone nuit, les comparaisons des indicateurs d'échauffement (Figure 4.19a) et de rafraîchissement (Figure 4.20a) ainsi que la comparaison des indicateurs d'échauffement global (Figure 4.19b) et de rafraîchissement global (Figure 4.20b), donnent la même information : aussi bien à court terme qu'à long terme, l'action relative aux ouvertures des fenêtres la nuit est l'action qui favorise le plus l'obtention de températures basses dans les deux variantes.

Les ordres de grandeur obtenus permettent d'affirmer que pour améliorer le confort dans la chambre 1 dans les deux variantes, il y a deux actions qui dominent, le taux d'ouverture des fenêtres la nuit et le taux d'ouverture des volets le matin. S'il faut en privilégier une, il est plus important d'ajuster le taux d'ouverture des fenêtres la nuit que de réguler le taux d'ouverture des volets le matin. Le contrôle ou la gestion de toutes les autres actions n'influe pas ou peu sur la température.

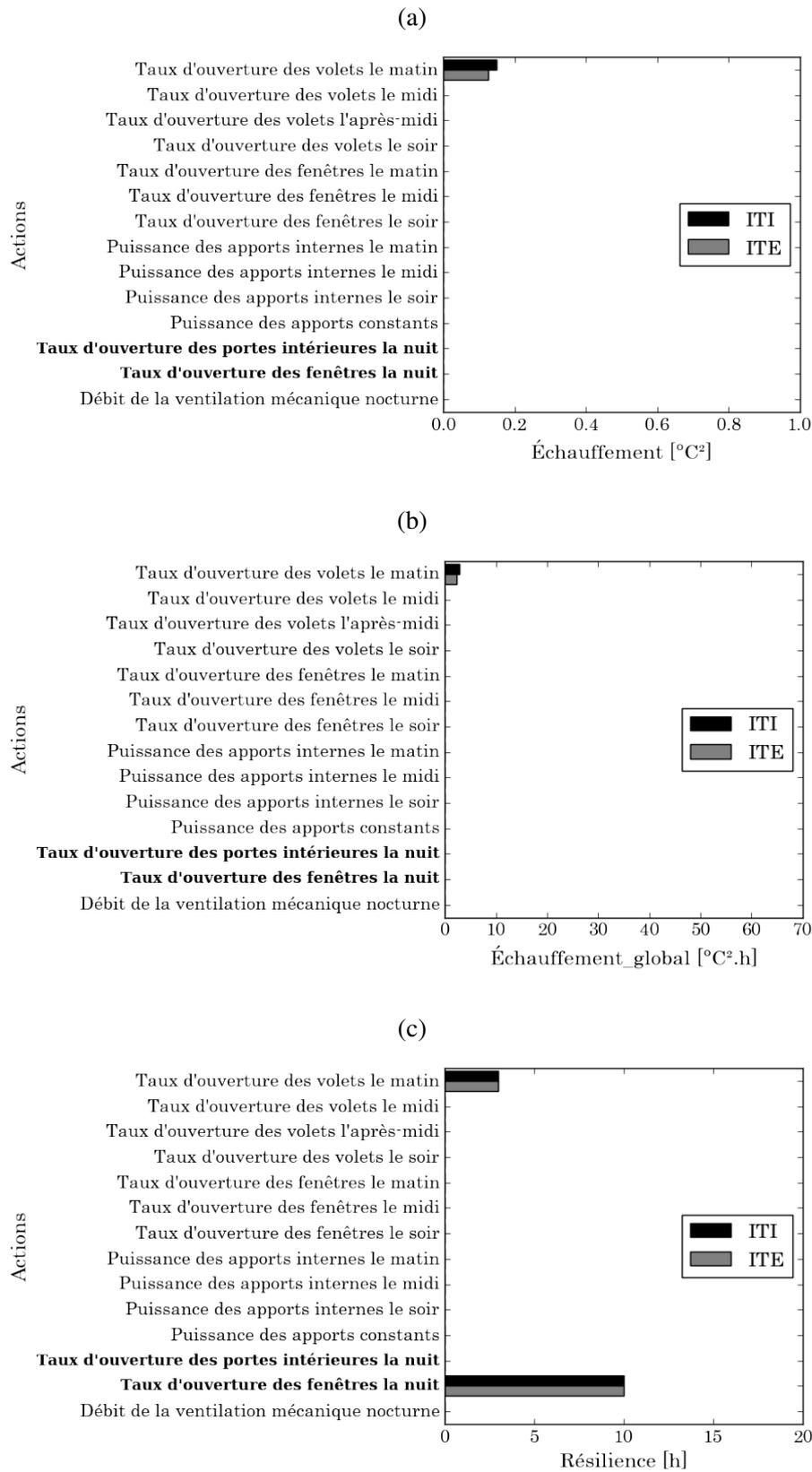


Figure 4.19 – Comparaison des indicateurs a) d'échauffement, b) d'échauffement global et c) de résilience dans la chambre 1 durant la nuit

4.3. Comparaison de deux modes de gestion : pertinence du recours à la ventilation naturelle nocturne

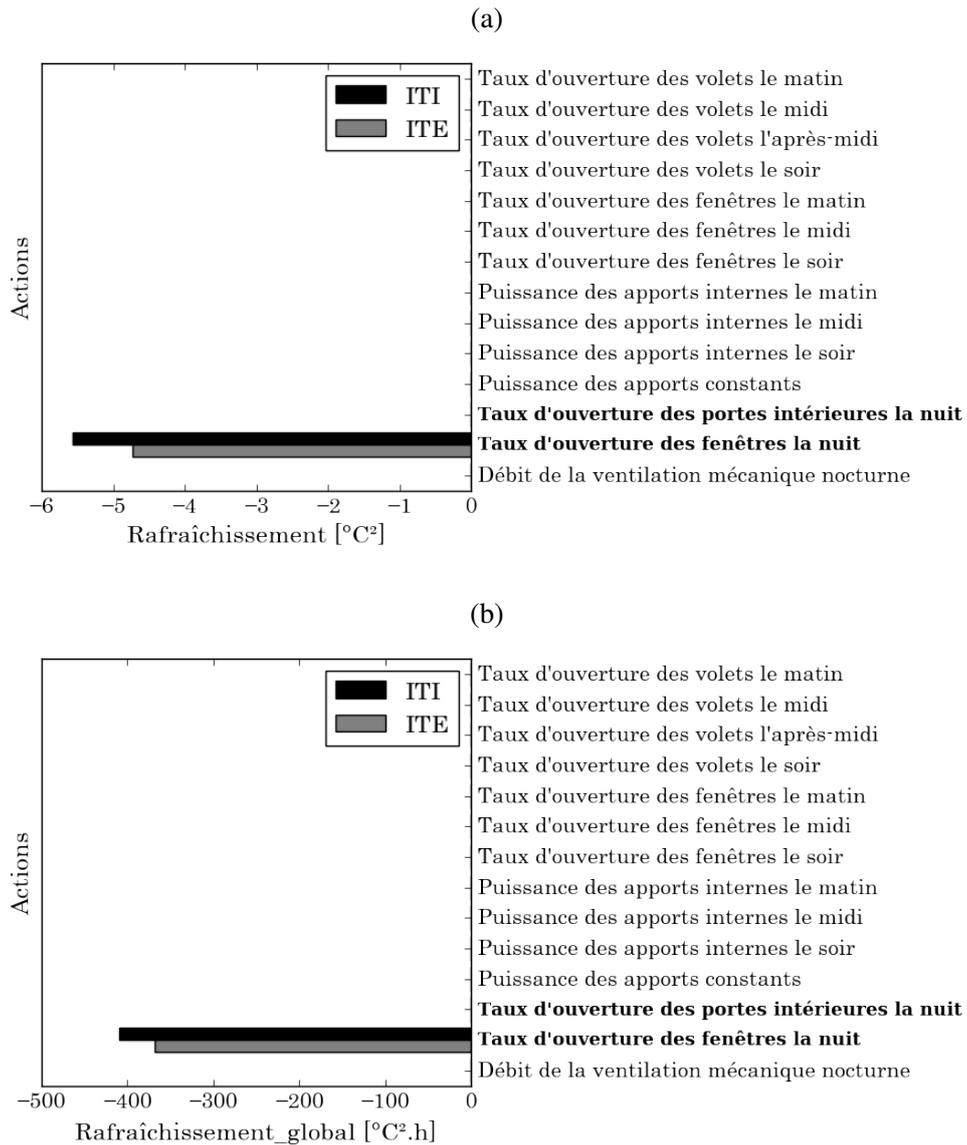


Figure 4.20 – Comparaison des indicateurs a) de rafraîchissement et b) de rafraîchissement global dans la chambre 1 durant la nuit

4.4 Conclusion : des comportements adaptés

Les indicateurs permettent de montrer de manière évidente qu'agir sur les fenêtres la nuit a plus d'effets bénéfiques sur le confort intérieur qu'agir sur les débits ou vitesses d'air proposés par le système de ventilation mécanique dans ce bâtiment. Cette conclusion est valable aussi bien pour la variante ITE, plus robuste aux actions tendant à faire augmenter la température, que pour la variante ITI plus sensible aux actions des occupants.

Lorsque la ventilation naturelle est permise, la variante ITE obtient de meilleurs résultats lorsque l'on compare les risques d'inconfort dans chaque zone. L'hypothèse de modélisation forte consistant à considérer le tirage thermique comme seul moteur de la ventilation naturelle donne des niveaux de débits conservateurs. En effet, les effets du vent ne sont pas pris en compte dans les modèles de même que le tirage thermique entre les niveaux de l'habitation. La différence de hauteur entre les fenêtres des deux niveaux est également un moteur de la ventilation naturelle non pris en compte.

Ainsi les comparaisons des choix de conception et des choix de gestion du bâti montrent qu'une forte inertie combinée à une ventilation naturelle nocturne rend le bâtiment plus confortable quel que soit le comportement de l'utilisateur vis à vis des autres actions testées. Avec la ventilation naturelle, l'impact de l'ouverture des fenêtres est très important. On se retrouve donc avec un bâtiment plus confortable mais plus sensible à l'occupant et sa gestion de la ventilation.

L'ouverture des fenêtres la nuit est donc un éco-comportement à privilégier aux dépens de systèmes techniques coûteux et peu efficaces pour réduire la température du bâtiment.

Conclusion générale

Le confort d'été dans un bâtiment sans climatisation est lié à la réponse thermique du bâtiment aux sollicitations internes et externes, aux interactions bâti-habitant-domotique mais également aux attentes des individus tant le confort est subjectif.

Pour mieux comprendre l'influence du comportement des habitants sur la température ressentie à l'intérieur de leur logement, il faut pouvoir évaluer l'impact de chaque action sur la réponse thermique du bâtiment. Pour quantifier cet impact, l'approche classique consiste à simuler différents états d'une action et d'observer l'impact de ces changements sur la sortie du modèle. Cette approche, en fonction du nombre d'états testés, peut s'apparenter à une analyse paramétrique. Les conclusions tirées de ce type d'étude sont fortement dépendantes des valeurs retenues pour les autres actions, fixées, dans le cas de référence. Une approche statistique globale permet alors de prendre en compte les influences des autres actions sur l'ambiance.

Pour répondre à cette problématique, l'analyse de sensibilité temporelle couplée à un outil de simulation thermique dynamique de bâtiment a été utilisée dans ces travaux de thèse. Ce couplage permet de quantifier statistiquement et au cours du temps la sensibilité et la robustesse à différentes actions de la réponse thermique d'un bâtiment modélisé. Il est ainsi possible de mettre en évidence, grâce à l'approche temporelle, la dynamique des influences en termes d'intensité et surtout de persistance de l'impact d'une action sur la température intérieure d'un bâtiment. La contrepartie de l'approche temporelle par rapport à une approche statique, basée sur un indicateur de confort agrégé, est qu'elle nécessite un effort supplémentaire d'exploitation des résultats. En effet, les indices de sensibilité sont plus nombreux, freinant la généralisation de cette démarche.

Ainsi, le principal aspect de ces travaux de thèse est le développement d'une méthodologie permettant d'extraire un maximum d'informations fournies par l'analyse de sensibilité temporelle. Dans un premier temps, un effort particulier a été fait sur la représentation graphique de l'ensemble des résultats de simulation thermique dynamique, afin de présenter plus en détail l'impact lié à la variabilité des actions des habitants vis-à-vis

du confort d'été en particulier le « risque d'inconfort » et la « marge de manœuvre ». Dans un deuxième temps, pour distinguer les actions qui tendent à faire augmenter la température de celles tendant à la faire diminuer, une nouvelle démarche a été proposée. Elle consiste à signer les indices de sensibilité. Ensuite, afin d'agrèger les multiples résultats donnés par les analyses de sensibilité temporelle et faciliter leur exploitation, 5 nouveaux indicateurs ont été créés : l'indicateur d'échauffement, d'échauffement global, de rafraîchissement, de rafraîchissement global et de résilience.

Ainsi, l'application de cette méthodologie sur une des maisons du projet COMEPOS a permis en premier lieu de diagnostiquer les périodes à risques d'inconfort chaud et la marge de manœuvre de température dans le bâtiment induits par le comportement des occupants. Il s'agit en d'autres termes de la robustesse de l'ambiance intérieure aux différentes actions de l'occupant. Dans le cas de l'étude présentée, en période de canicule, nous avons visualisé que durant un grand nombre d'heures, le risque d'inconfort chaud est supérieur à 60%. Cependant, la marge de manœuvre d'au moins 2°C en fonction des actions des occupants représente soit un risque d'intensité d'inconfort supplémentaire soit un gain de confort non négligeable.

Les indicateurs entrent en jeu dans la deuxième partie de l'étude afin de quantifier, à court terme et à long terme, la capacité d'une action des habitants à faire augmenter ou baisser la température intérieure. Ainsi, dans cette étude, l'indicateur de **rafraîchissement global** nous montre que, sur le long terme, l'action sur le débit de la ventilation mécanique nocturne a le plus d'influence pour faire baisser la température. À court terme, l'indicateur de **rafraîchissement** indique qu'il s'agit de l'action sur le taux d'ouverture des fenêtres le matin. Les indicateurs d'**échauffement** et d'**échauffement global** nous indiquent que le bâtiment est fortement sensible, aussi bien à long terme qu'à court terme, aux actions relatives au taux d'ouvertures des volets qui tendent à faire augmenter la température. Enfin, l'indicateur de **résilience** du bâtiment à certaines actions est supérieur à 24 heures. Cela signifie que d'une journée à l'autre les effets de ces actions sont encore significatifs.

Cette méthodologie peut être appliquée à d'autres modèles de bâtiment, sous d'autres conditions limites (conditions météorologiques notamment) et pour tout type d'actions. La méthodologie développée offre de ce fait une grande flexibilité en termes d'applications possibles.

La méthodologie a ainsi été utilisée pour comparer deux choix de conception (ITE ou ITI) et deux choix de gestion de la ventilation nocturne (mécanique ou naturelle) d'une maison individuelle. Nous avons démontré, grâce à la phase de diagnostic (risque d'incon-

fort et marge de manœuvre) et aux indicateurs, que la variante à forte inertie (ITE) combinée à une ventilation naturelle nocturne rend le bâtiment plus confortable quel que soit le comportement de l'usager vis à vis des autres actions testées. L'ouverture des fenêtres la nuit est donc un éco-comportement à privilégier aux dépens de systèmes techniques coûteux et peu efficaces pour réduire la température du bâtiment. En contrepartie, dans cette configuration, le bâtiment est alors extrêmement sensible à la gestion des ouvertures de fenêtre par les occupants.

En ce qui concerne les champs d'applications possibles de la méthodologie, d'autres problématiques que la gestion du confort thermique estival sont envisageables. Dans certains bâtiments, le maintien d'une température confortable durant la journée nécessite une bonne gestion du bâtiment par les occupants également en période d'intersaison. Durant cette période, lorsque le chauffage et la climatisation ne fonctionnent pas, des températures basses le matin et élevées dans l'après-midi peuvent apparaître. Mieux comprendre l'influence des actions des occupants permettrait de fournir des pistes pour limiter ces périodes d'inconfort.

Un autre champ d'applications possibles concerne le domaine de la Qualité de l'Air Intérieure (QAI). Grâce au calcul aéraulique, certains outils de STD intègrent une modélisation dynamique de la QAI pièce par pièce à partir des débits d'air calculés et de débits de polluants scénarisés (comme le sont les apports de chaleurs internes). En effet, ces outils intègrent des algorithmes pour modéliser la génération de CO_2 en fonction de la présence et du nombre d'occupants, et peuvent simuler l'évolution de sa concentration en fonction du taux de génération ou de sa décroissance causée par les infiltrations d'air, la ventilation mécanique ou l'ouverture des fenêtres. La QAI est un nouvel enjeu dans les bâtiments. Des solutions techniques dédiées sont proposées par les industriels comme par exemple la VMC pilotée sur le taux de CO_2 . Il peut alors être intéressant d'évaluer la capacité des actions des occupants à améliorer la QAI et de comparer les résultats à ceux de ces solutions techniques.

Perspectives

Dans la méthodologie développée, les actions des occupants dont les impacts sur la réponse thermique du bâtiment sont recherchés sont des entrées de la méthodologie. Cela offre ainsi une grande flexibilité d'usage en permettant au concepteur ou au gestionnaire d'adapter les actions à leurs besoins d'étude. Cependant, cette caractéristique peut également être vue comme un frein à l'appropriation de la méthodologie car elle ne guide pas le concepteur sur les actions à inclure dans l'analyse. En phase de conception et avec une typologie d'occupants prédéfinie, les concepteurs peuvent s'appuyer sur des outils générant des scénarios de comportements pour rechercher les actions les plus probables. Des logiciels de STD disposent en effet de modules de génération stochastique de comportement des occupants ¹.

L'influence de chaque action sur la température intérieure montre une variabilité temporelle sur la période d'étude. Cette variabilité au cours du temps est certes liée aux caractéristiques physiques du bâti mais également aux sollicitations externes variables : les conditions météorologiques. Dans ces travaux de thèse, la recherche de relations entre les variables météorologiques et l'intensité ou la persistance de l'influence d'une action n'a pas été étudiée. Établir ces relations amènerait une information supplémentaire sur la compréhension de l'influence d'une action sur la réponse thermique d'un bâtiment. Après avoir répondu à la question : Avec quelle intensité et avec quelle persistance une action influence-t-elle la réponse thermique d'un bâtiment ? La connaissance de ces relations pourrait permettre de répondre à la question : Sous quelles conditions météorologiques ? En fonction des réponses apportées, cela permettrait par exemple de favoriser les éco-comportements les jours où les prévisions météorologiques sont les plus propices à leur utilisation.

1. par exemple, le module AMAPOLA du logiciel Pléiades

Bibliographie

- AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. 2018, «The Future of Cooling. Opportunities for energy-efficient air conditioning», *OECD/IEA*, Paris (France).
- ALZOUHRI ALYAFI A. 2019, «Génération d'explications pour la gestion énergétique dans les bâtiments», Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes (France).
- ANDERSEN R. K. 2012, «The influence of occupants' behaviour on energy consumption investigated in 290 identical dwellings and in 35 apartments», dans *Proceedings of Healthy Buildings*, Brisbane (Australie).
- ASHRAE STANDARD 55. 1992, «Thermal environmental conditions for human occupancy».
- BONTE M. 2014, «Influence du comportement de l'occupant sur la performance énergétique du bâtiment : modélisation par intelligence artificielle et mesures in situ», thèse de doctorat, Université de Toulouse (France).
- BRISEPIERRE G. ET ROCHE T. 2013, «Les conditions sociales et organisationnelles d'une performance énergétique *in vivo* dans les bâtiments neufs», Éditions *Leroy Merlin Source*, -.
- BROWN Z. B., DOWLATABADI H. ET COLE R. J. 2009, «Feedback and adaptive behaviour in green buildings», *Intelligent Buildings International*, vol. 1, n° 4, p. 296–315.
- CARLUCCI S. ET PAGLIANO L. 2012, «A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings», *Energy and Buildings*, vol. 53, p. 194–205.
- CHASTAING G. 2013, «Indices de sobol généralisés pour variables dépendantes», Thèse de doctorat, Université de Grenoble (France).
- COMEPOS. 2019, «Le projet COMEPOS», <http://comepos.fr/index.php/a-propos-de-comepos/contexte-et-objectifs>.

- CORRADO V. ET MECHRI H. E. 2009, «Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Energy Rating», *Journal of Building Physics*, vol. 33, n° 2, p. 125–156.
- CUKIER R. I., FORTUIN C. M., SHULER K. E., PETSCHKE A. G. ET SCHAIBLY J. H. 1973, «Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients. I Theory», *The Journal of Chemical Physics*, vol. 59, n° 8, p. 3873–3878.
- DE DEAR R. J. ET BRAGER G. S. 2002, «Thermal comfort in naturally ventilated buildings : revisions to ASHRAE Standard 55», *Energy and buildings*, vol. 34, n° 6, p. 549–561.
- ENERGYPLUS. 2016, «Engineering Reference», <https://energyplus.net/documentation>.
- ENERGYPLUS. 2019a, «Input Output Reference», <http://energyplus.net/documentation>.
- ENERGYPLUS. 2019b, «Testing and Validation», <http://energyplus.net/testing>.
- FANGER P. 1967, «Calculation of thermal comfort, introduction of a basic comfort equation», *ASHRAE Transactions*, vol. 73.
- GAETANI I., HOES P.-J. ET HENSEN J. L. 2016, «On the sensitivity to different aspects of occupant behaviour for selecting the appropriate modelling complexity in building performance predictions», *Journal of Building Performance Simulation*, p. 1–11.
- GATELLI D., KUCHERENKO S., RATTO M. ET TARANTOLA S. 2009, «Calculating first-order sensitivity measures : A benchmark of some recent methodologies», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 94, n° 7, p. 1212–1219.
- GEIC. 2018, «Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux pré-industriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté», *Organisation météorologique mondiale*, p. 32, Genève (Suisse).
- GOFFART J. 2013, «Impact de la variabilité des données météorologiques sur une maison basse consommation. Application des analyses de sensibilité pour des entrées temporelles.», Thèse de doctorat, Université de Grenoble (France).
- GONDIAN L., GOFFART J., WOLOSZYN M., WURTZ E., BUHÉ C. ET MARÉCHAL P. 2019, «Towards assessing houses resistance and resilience indicators at inhabitants'

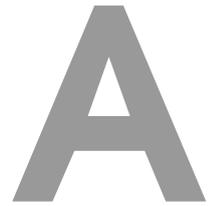
-
- actions using temporal sensitivity analysis», dans *Proceedings of Building Simulation 2019 : 16th Conference of IBPSA*, Roma (Italie).
- HELTON J. C. ET DAVIS F. J. 2003, «Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 81, n° 1, p. 23–69.
- HERMAN J. ET USHER W. 2017, «SALib : An open-source python library for sensitivity analysis», *The Journal of Open Source Software*, vol. 2, n° 9.
- HOMMA T. ET SALTELLI A. 1996, «Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 52, n° 1, p. 1–17.
- HOWARD-REED C., WALLACE L. A. ET OTT W. R. 2002, «The Effect of Opening Windows on Air Change Rates in Two Homes», *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 52, n° 2, p. 147–159.
- IDELECPLUS. 2017, «Le marché du bâtiment en 2017 face à l'efficacité énergétique», <https://www.idelecplus.com/telecharger-marche-batiment-2017-efficacite-energetique>.
- IGNJATOVIC M., BLAGOJEVIC B., STOJILJKOVIC M., MITROVIC D., ANDJELKOVIC A. ET LJUBENOVIC M. 2016, «Sensitivity analysis for daily building operation from the energy and thermal comfort standpoint», *Thermal Science*, vol. 20, p. 1485–1500.
- IOANNOU A. ET ITARD L. C. M. 2015, «Energy performance and comfort in residential buildings : Sensitivity for building parameters and occupancy», *Energy and Buildings*, vol. 92, p. 216–233.
- IOOSS B. 2011, «Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques», *Journal de la Societe Française de Statistique*, vol. 152, n° 1, p. 1–23.
- ISO 7730. 2006, «Ergonomie des ambiances thermiques détermination analytique et interprétation du confort par des critères de confort thermique local».
- JACQUES J. 2005, «Contributions à l'analyse de sensibilité et à l'analyse discriminante généralisée», Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble (France).
- JANDA K. 2011, «Buildings don't use energy : People do», *Architectural Science Review*, vol. 54, p. 15–22.
- KUCHERENKO S., SALTELLI A. ET ALBRECHT D. 2006, «Comparison of Latin Hypercube and Quasi Monte Carlo Sampling Techniques», <http://samo2016.sciencesconf.org/file/270861>.
-

- LANGEVIN J., WEN J. ET GURIAN P. L. 2015, «Simulating the human-building interaction : Development and validation of an agent-based model of office occupant behaviors», *Building and Environment*, vol. 88, p. 27–45.
- LEE Y. S. ET MALKAWI A. M. 2014, «Simulating multiple occupant behaviors in buildings : An agent-based modeling approach», *Energy and Buildings*, vol. 69, p. 407–416.
- LEHMANN B., GYALISTRAS D., GWERDER M., WIRTH K. ET CARL S. 2013, «Intermediate complexity model for Model Predictive Control of Integrated Room Automation», *Energy and Buildings*, vol. 58, p. 250–262.
- MARA T. ET TARANTOLA S. 2008, «Application of Global Sensitivity Analysis of Model Output to Building Thermal Simulations», *Building Simulation*, vol. 1, p. 290–302.
- MARA T. A. ET JOSEPH O. R. 2008, «Comparison of some efficient methods to evaluate the main effect of computer model factors», *Journal of Statistical Computation and Simulation*, vol. 78, n° 2, p. 167–178.
- MARTANI C., LEE D., ROBINSON P., BRITTER R. ET RATTI C. 2012, «ENERNET : Studying the dynamic relationship between building occupancy and energy consumption», *Energy and Buildings*, vol. 47, p. 584–591.
- MCCARTNEY K. J. ET FERGUS NICOL J. 2002, «Developing an adaptive control algorithm for Europe», *Energy and Buildings*, vol. 34, n° 6, p. 623–635.
- MORRIS M. D. 1991, «Factorial sampling plans for preliminary computational experiments», *Technometrics*, vol. 33, n° 2, p. 161–174.
- MOSER G. 2009, «Psychologie environnementale : les relations homme-environnement», Éditions *De Boeck*, Bruxelles (Belgique).
- MUNARETTO F. 2014, «Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments», Thèse de doctorat, ENMP Paris (France).
- MÉTÉOFRANCE. 2014, «Le réchauffement climatique observé à l'échelle du globe et en France», <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-rechauffement-observe-a-l-echelle-du-globe-et-en-france>.
- MÉTÉOFRANCE. 2018a, «Bilan climatique de l'été 2018», <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2018/bilan-climatique-de-l-ete-2018>.
- MÉTÉOFRANCE. 2018b, «Vagues de chaleur et canicules», <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/meteo-et-sante/canicules>.

-
- MÉTÉOFRANCE. 2019, «Bilan climatique de l'été 2019», <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2019/bilan-climatique-de-l-ete-2019>.
- NF EN 15251. 2007, «Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique».
- NICOL J. F. 2001, «Characterising occupant behavior in buildings : Towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds, heaters and fans», dans *Proceedings of the Seventh International IBPSA Conference*, Rio de Janeiro (Brésil).
- NICOL J. F. ET HUMPHREYS M. A. 2002, «Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings», *Energy and Buildings*, vol. 34, n° 6, p. 563–572.
- NIK V., MATA E., SASIC KALAGASIDIS A. ET SCARTEZZINI J.-L. 2016, «Effective and robust energy retrofitting measures for future climatic conditions : Reduced heating demand of swedish households», *Energy and Buildings*, vol. 121, p. 176–187.
- O'BRIEN W., KAPSIS K., ATHIENITIS A. ET KESIK T. 2010, «Methodology for quantifying the performance implications of intelligent shade control in existing buildings in an urban context», dans *Proceedings of SimBuild*, New York City (USA).
- PAGE J., ROBINSON D., MOREL N. ET SCARTEZZINI J. L. 2008, «A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence», *Energy and Buildings*, vol. 40, n° 2, p. 83–98.
- PEETERS L., DEAR R. D., HENSEN J. ET D'HAESELEER W. 2009, «Thermal comfort in residential buildings : Comfort values and scales for building energy simulation», *Applied Energy*, vol. 86, n° 5, p. 772–780.
- PEUPOORTIER B. 2016, «Énergétique des bâtiments et simulation thermique», Éditions Eyrolles, Paris, (France).
- PLISCHKE E. 2017, «Global Sensitivity Analysis», <http://riskinstitute.uk/easterschool/uploads/elmar/Liverpool2.pdf>.
- RABOUILLE M., WURTZ E. ET PERROTIN P. 2013, «Analysis of dynamic thermal simulation for refurbishment», dans *Proceedings of BS 2013 : 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, Chambéry (France).
- RASOULI M., GE G., SIMONSON C. J. ET BESANT R. W. 2013, «Uncertainties in energy and economic performance of HVAC systems and energy recovery ventilators
-

- due to uncertainties in building and HVAC parameters», *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, n° 1, p. 732–742.
- ROULEAU J. 2019, «Exploration in-situ et numérique de la consommation énergétique et du confort thermique des bâtiments résidentiels en bois», Thèse de doctorat, Université Laval, Québec (Canada).
- SALTELLI A. 2008, «Global Sensitivity Analysis : The Primer», Éditions *John Wiley & Sons Ltd*, Chichester, (Angleterre).
- SALTELLI A. ET ANNONI P. 2010, «How to avoid a perfunctory sensitivity analysis», *Environmental Modelling & Software*, vol. 25, n° 12, p. 1508–1517.
- SALTELLI A., TARANTOLA S., CAMPOLONGO F. ET RATTO M. 2004, «Sensitivity Analysis in Practice : A Guide to Assessing Scientific Models», Éditions *John Wiley & Sons Ltd*, Chichester (Angleterre).
- SALTELLI A., TARANTOLA S. ET CHAN K. P.-S. 1999, «A Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output», *Technometrics*, vol. 41, n° 1, p. 39–56.
- SAPORTA G. 2006, «Probabilités, analyse des données et statistique», Éditions *TECHNIP*, Paris (France).
- SHEN E., HU J. ET PATEL M. 2014, «Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies», *Building and Environment*, vol. 78, p. 155–170.
- SOBOL' I., M. 1993, «Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models», *Math. Model. Comput. Exp.*, vol. 1, n° 4, p. 407–414.
- SPITZ C. 2012, «Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments», Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes (France).
- SWATEK. 2017, «La Gestion Technique du Bâtiment», <http://www.swatek.tn/la-gestion-technique-du-batiment/>.
- TARANTOLA S. 2014, «Overview of Methods», <https://ec.europa.eu/jrc/en/event/training-course/samo-2018>.
- TARANTOLA S., GATELLI D. ET MARA T. A. 2006, «Random balance designs for the estimation of first order global sensitivity indices», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 91, n° 6, p. 717–727.

- TIAN W. 2013, «A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, p. 411–419.
- TIAN W., HEO Y., WILDE DE P., LI Z., YAN D., PARK C. S., FENG X. ET AUGENBROE G. 2018, «A review of uncertainty analysis in building energy assessment», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, p. 285–301.
- TROCMÉ M. 2009, «Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie», Thèse de doctorat, ENMP Paris (France).
- VORGER E. 2014, «Étude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment», Thèse de doctorat, ENMP Paris (France).
- WILKE U., HALDI F., SCARTEZZINI J.-L. ET ROBINSON D. 2013, «A bottom-up stochastic model to predict building occupants' time-dependent activities», *Building and Environment*, vol. 60, p. 254–264.
- WOLOSZYN M. 1999, «Modélisation hygro-thermo-aéraulique des bâtiments multi-zones : proposition d'une stratégie de résolution du système couplé», Thèse de doctorat, INSA Lyon (France).
- WOLOSZYN M. ET RODE C. 2008, «Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings», *Building Simulation*, vol. 1, p. 5–24.



Description du cas d'étude

A.1 Description thermique

Fiche descriptive du bâtiment démonstrateur

Données générales

Composition famille : 2 adultes + 2 enfants en bas âge

Typologie de maison : T4 avec R+1

SHON RT = 107 m²

Surface habitable = 80 m²

Localisation : Ozoir la Ferrière (77)

Altitude = 100 m

Perméabilité = 0.51 m³/(h/m²) sous 4Pa

Date de livraison : habitée depuis mi-janvier 2017



Façade Sud

Résultats RT2012 du 17/03/2016

Coefficient C_{eps}SANS production ENR = 58.9 kWhEP/m²SHONRT.an

Production ENR = 77.9 kWhEP/m²SHONRT.an

Coefficient C_{ep}AVEC production ENR = - 19 kWhEP/m²SHONRT.an

Bbio = 50.1 points

Tic = 28.6 °C

Enveloppe

Bâti :

Murs extérieurs :

- 20 cm de parpaing
- ITI : 10 cm de mousse polyuréthane R=4.4 m².K/W, λ =0.022 W/m.K + 4.5 cm de laine de verre R=1.2 m².K/W, λ =0.035 W/m.K

Combles non aménagés :

- 40 cm de laine de verre R=12.4 m².K/W, λ =0.032 W/m.K + 5 cm de mousse polyuréthane R=2.3 m².K/W, λ =0.022 W/m.K

Plancher bas :

- 16 cm entrevous léger non isolant
- 10 cm de mousse polyuréthane R=4.7 m².K/W, λ =0.022 W/m.K
- 5 cm dalle flottante

Vitrages :

Fenêtres et portes fenêtres :

- En façade Nord : Menuiserie bois, triple vitrage, volet roulant, caractéristiques Uw =1.4 W/m².K, FS =0.37, TL =0.49
- En façade Sud: Menuiserie bois, double vitrage, Argon, Uw =2 W/m².K, FS =0.45, TL =0.56
- ΔR volets roulants = 0.26 m².K/W
- Brises soleil fixes en façade Sud (profondeur = 1 m)

Porte d'entrée :

- Porte métallique, Ud =1 W/m².K,

Porte accès garage :

- N/A

Systèmes

Systèmes : Ventilation double flux avec résistances électriques, Chauffe-eau thermodynamique sur air extérieur

Chauffage :

- Energie → électricité
- Emetteurs → Bouches de soufflage de la **ventilation double flux** et radiateur sèche-serviette SDB 500W
- Générateur de chaleur → **750W de résistance électrique par bouche de soufflage, Echangeur de chaleur**
- Présence d'un circuit de recyclage d'air pour le chauffage

ECS :

- Energie → électricité
- Distribution → ballon de stockage de 150L
- Générateur de chaleur → **PAC air extérieur** $COP_{ECS}=3.42$, puissance calorifique = 3.5kW-4.5kW

Ventilation :

- Bouches d'extraction autoréglables
- Régulation : 1 thermostat par pièce de vie
- Ventilateur : puissance 45W en continu et 80W en mode boost

Production/Stockage d'énergie

Photovoltaïque :

- 6 kWc installée en toiture Sud
- Onduleur Imeon

Stockage :

- Autoconsommation souhaitée
- 5 kWh de batterie

Régulation/pilotage

Régulation de chauffage :

- Chauffage, présence d'un thermostat dans chaque pièce

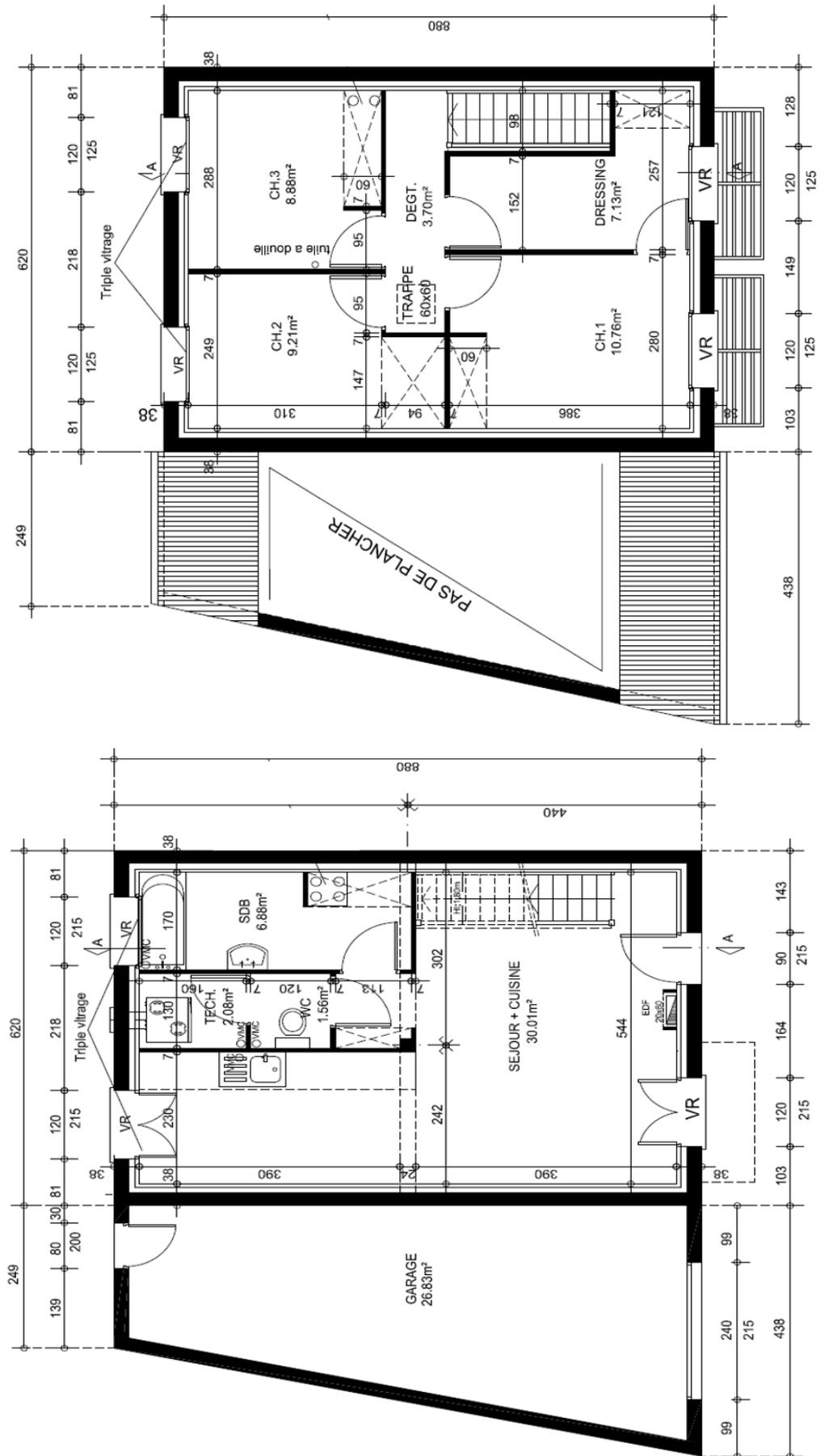
Pilotage :

- Volets roulants (tablette ou smartphone ou algorithme de pilotage grâce à la sonde extérieure)

Instrumentation – Gestion CEA

- Sonde de confort : Température, Humidité relative, CO2 dans le séjour et une chambre + Température et Humidité Relative dans les autres chambres et la salle de bain
- Compteur électrique : Général (TIC), Chauffage/Ventilation (résistances électriques + moteur de la ventilation), ECS(PAC), Prises électriques intérieures, sèche serviette
- Météo : Température extérieure en façade Nord et Rayonnement Solaire en façade Sud
- Energie renouvelable : énergie produite par les panneaux, énergie stockée dans la batterie, énergie consommée

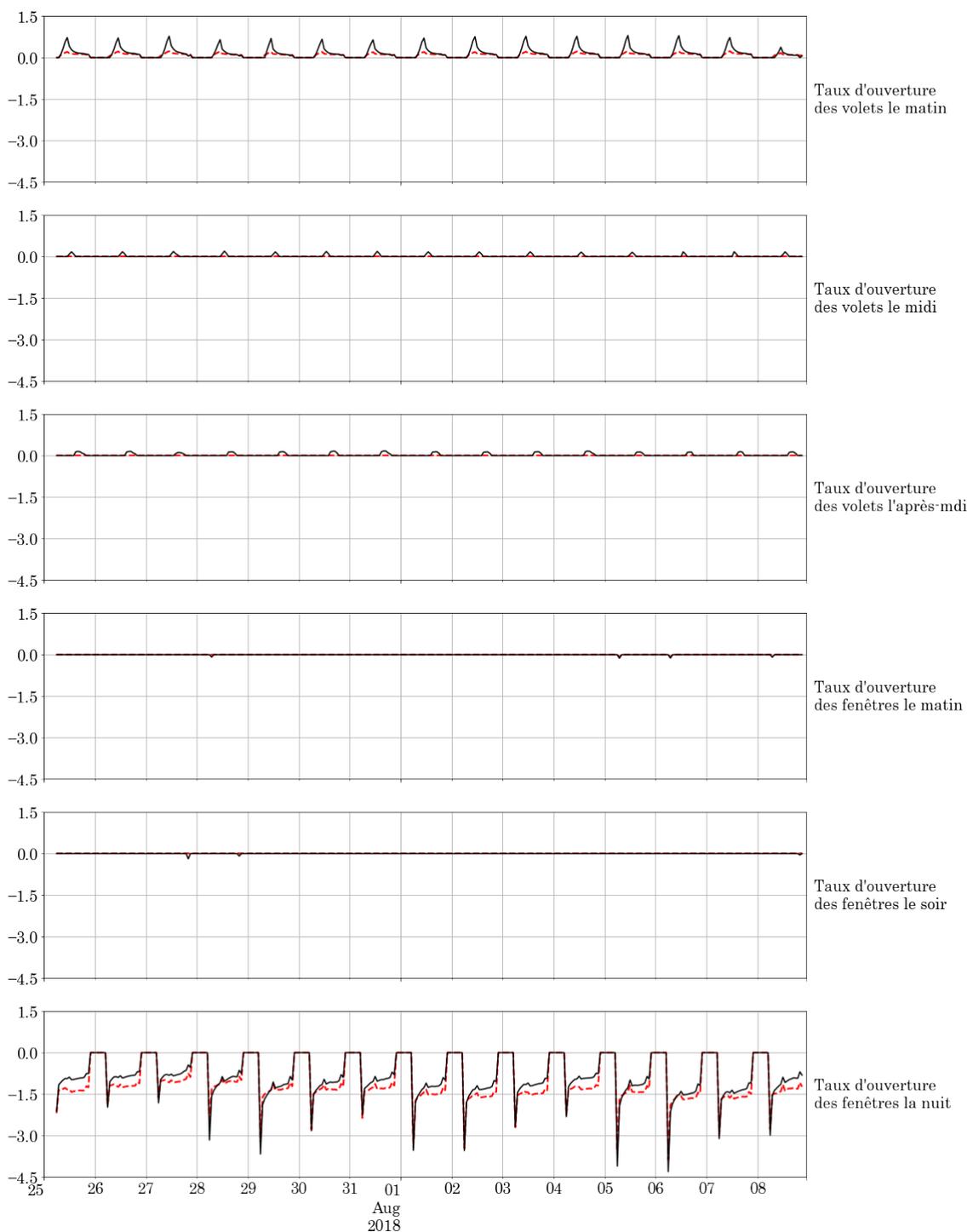
A.2 Plans



B

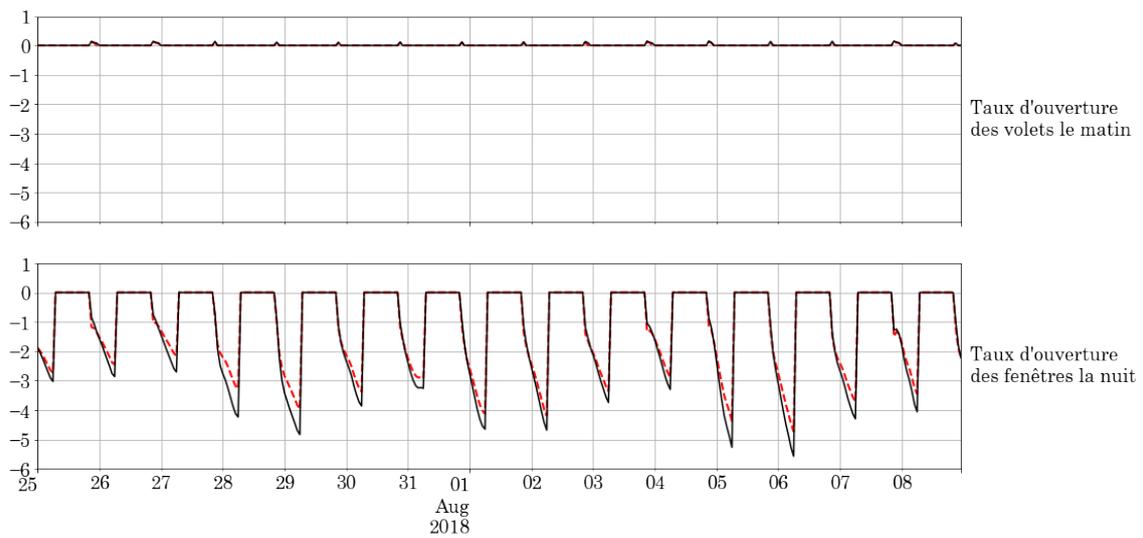
Étude de la ventilation naturelle - Variances partielles signées

B.1 Variances partielles signées obtenues dans le séjour-cuisine



Évolution des variances partielles signées pour les 6 actions influentes dans la zone séjour-cuisine sur les heures de journée de 7h à 22h pour la variante ITI (en noir) et la variante ITE (en rouge)

B.2 Variances partielles signées obtenues dans la chambre 1



Évolution des variances partielles signées pour les 6 actions influentes dans la chambre 1 sur les heures de nuit de 7h à 22h pour la variante ITI (en noir) et la variante ITE (en rouge)

Résumé

Avec des vagues de chaleur plus fréquentes et plus sévères dans les années futures, les bâtiments construits aujourd'hui et qui seront exploités pendant plusieurs dizaines d'années, doivent assurer le confort des occupants malgré des conditions estivales caniculaires. En phase d'exploitation, le pilotage automatisé des protections solaires, la surventilation mécanique nocturne et d'autres solutions techniques connaissent des limites en termes d'acceptation et d'appropriation par les occupants. Il est ainsi indispensable de repenser le bâtiment avec l'occupant au centre de la gestion du confort interne et comprendre l'influence de ces comportements avec ou sans systèmes sur la réponse thermique du bâtiment. Ces travaux de thèse se sont ainsi intéressés au développement d'une méthodologie permettant de quantifier l'influence d'actions ciblées des occupants sur le comportement thermique de maisons individuelles. Basée sur des analyses de sensibilité globales couplées à de la simulation thermique dynamique, la démarche proposée consiste à déterminer l'intensité et la persistance avec lesquelles une action influence la température intérieure d'un bâtiment. Il en résulte la création de 5 nouveaux indicateurs. Ces indicateurs offrent la possibilité d'agréger les multiples informations fournies par les analyses de sensibilité temporelles réalisées et permettent ainsi d'exploiter aisément les résultats issus de cette approche temporelle. Les indicateurs ont été appliqués dans ces travaux de thèse sur une maison individuelle pour analyser plusieurs choix constructifs (ITE ou ITI) et plusieurs modes de gestion de la ventilation nocturne (mécanique ou naturelle) d'un même bâtiment. Il en ressort que la variante à forte inertie combinée à une ventilation naturelle nocturne rend le bâtiment plus confortable quel que soit le comportement de l'utilisateur vis à vis des autres actions testées. L'ouverture des fenêtres la nuit est donc un éco-comportement à privilégier aux dépens de systèmes techniques coûteux et peu efficaces pour réduire la température du bâtiment. En contrepartie, dans cette configuration, le bâtiment est alors extrêmement sensible à la gestion des ouvertures de fenêtre par les occupants.

Mots-clés : Analyse de sensibilité temporelle globale, bâtiment résidentiel, confort d'été, action des occupants, indicateurs d'intensité et de persistance.

Abstract

In the coming years, heat waves will be more and more frequent and severe. In that context, the new buildings must ensure thermal comfort to the occupants despite hot summer conditions and this for the several decades of its operation. During the occupancy phase, automated control of solar shadings, night mechanical ventilation and other technical solutions have limitations in terms of occupants' acceptance and ownership. In order to give adapted recommendations, it is necessary to understand the influence of different occupants' actions on the building thermal response. This thesis focuses on the development of a methodology to quantify the influence of targeted actions of the occupants on the thermal behaviour of detached homes. Based on global sensitivity analysis coupled with dynamic thermal simulation, the proposed approach determines the intensity and the persistence with which an action influences the indoor temperature. Five new performance indicators are created. These indicators aggregate the vast amount of information provided by the temporal sensitivity analyses and facilitate detailed investigations and comparative studies. These indicators are then applied to a case study to analyse several constructive choices (low and high inertia) and several management methods of the ventilation (natural or mechanical) of the same building. It shows that the high inertia variant combined with natural night ventilation makes the building more comfortable regardless of the other tested actions. Opening windows at night is therefore an eco-behavior to be preferred at the expense of expensive and inefficient technical systems to reduce the temperature of the building. In return, in this configuration, the building is then extremely sensitive to the management of the window openings.

Keywords : Temporal global sensitivity analysis, residential building, summer thermal comfort, inhabitants' action, indicators of intensity and persistence.